

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE AO GALGAMENTO E
INUNDAÇÃO COSTEIRA EM AMBIENTES DE PRAIA
ENCAIXADA.**

Márcia Cristina Barrento de Sousa

**MESTRADO EM GEOLOGIA DO AMBIENTE, RISCOS GEOLÓGICOS,
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Rui Taborda

Agradecimentos

A realização desta dissertação representou um grande desafio a nível pessoal e profissional que me fez crescer e aprender, descobrindo e aperfeiçoando competências que eu desconhecia ter.

Em primeiro lugar um agradecimento especial ao meu orientador, o Professor Rui Taborda pela dedicação e compreensão ao longo deste trabalho. Esteve sempre disponível, apesar dos seus vários compromissos, e sem a sua orientação teria sido muito mais difícil a concretização desta dissertação.

Agradecer à professora Ana Silva Nobre que se disponibilizou para me acompanhar à Ericeira, auxiliando-me na recolha dos dados.

Um agradecimento à Bárbara Proença da FCUL que me ajudou na fase inicial da programação em *MatLab*.

Às instituições que apoiam os projetos de investigação, incentivando a partilha de conhecimento, tanto através da cedência de informação como através de mecanismos de colaboração e parcerias, em particular à FCUL e à APA com o Programa COSMO.

Quero agradecer aos meus amigos que sempre me apoiaram e incentivaram. Estiveram presentes nos momentos mais difíceis e ajudaram-me a manter o foco e a ultrapassar as adversidades. Ao grupinho da faculdade que tornaram esta experiência mais divertida e enriquecedora.

E como os últimos são sempre os primeiros, um agradecimento especial à minha família. Ao meu pai que sempre acreditou nas minhas capacidades e incentivou-me sempre a dar o meu melhor, sem ele não teria chegado onde cheguei. À minha mãe pelo carinho, paciência e compreensão, por me incentivar a não desistir, respeitando o meu tempo. Aos meus tios e primos que me apoiaram sempre, dando forças para continuar.

Resumo

O estudo do galgamento e inundação costeira é fundamental para apoiar uma gestão sustentada do território costeiro. No entanto, o estudo deste fenómeno em contextos de praias limitadas por arribas encontra-se ainda pouco desenvolvido e a aplicação das fórmulas empíricas utilizadas em contexto de litoral arenoso tem-se revelado pouco eficaz.

Esta dissertação teve como principal objetivo avaliar a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos, num contexto de praia encaixada. Um bom exemplo deste contexto geomorfológico particular é a praia do Sul ou da Baleia localizada na Ericeira, que constitui a zona de estudo.

Para modelar a propagação agitação marítima do largo para a costa utilizaram-se duas estratégias de modelação (modelo SWAN e a teoria linear) que, no contexto particular em que foram aplicadas, revelaram resultados semelhantes. A estimação do alcance da cota de máximo espraio foi obtida através de simulações com o modelo *XBeach* (aplicado em perfil – modo 1D e sobre uma malha batimétrica – modo 2D) desde a batimétrica aproximada dos 20 m até ao limite do espraio. As diferentes estratégias de modelação foram aplicadas e validadas em condições de baixa energia (onde foram obtidos dados de campo de alta resolução), uma tempestade moderada (*Bella* – dezembro de 2020) e uma tempestade extrema (*Christina* – janeiro de 2014).

Os valores de *runup* calculados pelos métodos analíticos mostram que estas formulações empíricas tendem a sobrestimar significativamente o *runup* principalmente em condições de tempestade. Os valores da cota de máximo espraio resultantes do modelo *XBeach* são concordantes com os observados em campo, no entanto a aplicação no modo 2D bidimensional subestimou os valores da cota de máximo espraio.

Os resultados obtidos no âmbito desta dissertação mostraram que o modelo *XBeach* consegue representar adequadamente os fenómenos de galgamento costeiro em ambientes de praia encaixada.

Palavras-chave: *XBeach*, galgamento oceânico, *runup*, Ericeira

Abstract

The study of coastal overflow and flooding is essential to support sustainable management of coastal territory. However, the study of this phenomenon in contexts of beaches limited by cliffs is still underdeveloped and the application of the empirical formulas used in the context of a sandy coastline has proved to be ineffective.

This dissertation had as main objective to evaluate the coastal vulnerability associated with ocean overtopping, in a context of embedded beach. A good example of this particular geomorphological context is Praia do Sul or Baleia located in Ericeira, which constitutes the study area.

To model the propagation of sea waves from the broad to the coast, were used two modeling strategies (SWAN model and linear theory), which in the particular context that they were applied revealed similar results. The estimation of the maximum spread height range was obtained through simulations with the XBeach model (applied in profile - 1D mode and on a bathymetric mesh - 2D mode) from the approximate bathymetric of 20 m to the spread limit. The different modeling strategies were applied and validated in low energy conditions (where high-resolution field data were obtained), a moderate storm (Bella - December 2020) and an extreme storm (Christina - January 2014).

The runup values calculated by the analytical methods show that these empirical formulations tend to significantly overestimate the runup mainly in stormy conditions. The values of the maximum spread resulting from the XBeach model are in agreement with those observed in the field, however the application in 2D mode underestimated the values of the maximum spread range.

The results obtained in the scope this dissertation showed that the XBeach model is able to adequately represent the coastal overtopping phenomena in embedded beach environments.

Key words: *XBeach*, wave overtopping, wave *runup*, Ericeira

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Conceitos.....	3
2.1. Galgamento e inundação.....	3
2.2. Ondas e nível do mar	4
2.3. Geomorfologia de praias sobre plataforma rochosa	5
3. Métodos.....	6
3.1. Modelos analíticos para o cálculo do <i>runup</i>	6
3.2. Propagação da agitação marítima	9
3.2.1. Propagação da agitação através da teoria linear.....	9
3.2.2. SWAN.....	10
3.2.3. XBeach.....	10
3.2.3.1. Processos físicos	12
3.2.3.2. Dados de entrada	13
3.2.3.3. Dados de saída.....	15
4. Caso de Estudo.....	16
4.1. Enquadramento geográfico e geomorfológico.....	16
4.2. Agitação marítima.....	18
4.2.1. Agitação ao largo	18
4.2.2. Agitação junto à costa e observação de galgamento costeiro	20
4.2.2.1. Evento de baixa energia.....	20
4.2.2.2. Evento de tempestade moderada	21
4.2.2.3. Evento de tempestade extrema	23
4.3. Maré.....	25
4.3.1. Evento de baixa energia	25
4.3.2. Evento de tempestade moderada	26
4.3.3. Evento de tempestade extrema.....	26
4.4. Topo-batimetria.....	27
4.4.1. Modelo Bidimensional	27
4.4.2. Modelo Unidimensional- Perfis de praia	28
4.4.2.1. Perfil retirado da malha	28

4.4.2.2.	Perfil GPS	29
4.4.2.3.	Perfis Totais do COSMO.....	30
4.5.	Condições de aplicação da metodologia	31
4.5.1.	Condições de aplicação das fórmulas empíricas	31
4.5.2.	Condições de aplicação para o SWAN	31
4.5.3.	Condições de aplicação da teoria linear	33
4.5.4.	Condições de aplicação do <i>XBeach</i>	33
5.	Resultados	34
5.1.	Evento de baixa energia	34
5.1.1.	Medição do espraio	34
5.1.2.	Modelação do espraio.....	36
5.2.	Evento de tempestade moderada.....	38
5.2.1.	Influência do perfil da praia para o cálculo da CME	40
5.2.2.	Resultados do modelo bidimensional.....	44
5.3.	Evento de tempestade extrema.....	47
6.	Conclusões	51
7.	Bibliografia.....	53

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema ilustrativo das várias componentes que determinam a cota de máximo espraio (adaptado de Silva et al., 2013).....	3
Figura 2: Esquema representativo das diversas componentes das ondas (retirado de Hermínio,2015).....	4
Figura 3: Representação esquemática de um perfil típico de praia sobre plataforma rochosa (Adaptado de Taborda e Ribeiro, 2015).....	5
Figura 4: Esquema representativo da metodologia utilizada nesta dissertação.....	6
Figura 5: A) runup subestimado; B) runup sobrestimado (retirado de Hermínio,2015). .	9
Figura 6: Propagação das ondas no modo hidrostático (imagem superior) e no modo não hidrostático (imagem inferior) no XBeach (retirado de Heleno, 2017).	12
Figura 7: Grelha do domínio no XBeach (retirado Roelvink et al., 2010).	13
Figura 8: Grelha definidora das direções das ondas no XBeach (retirado de Bieman, 2013).....	14
Figura 9: Esquema ilustrativo do funcionamento do modelo XBeach (adaptado de Heleno,2017).	15
Figura 10:Enquadramento geográfico da praia do Sul, Ericeira.	16
Figura 11: Fotografia da praia do Sul, evidenciando a plataforma rochosa submersa e o passeio marítimo que limita a praia do lado terrestre.	17
Figura 12: Distribuição de frequências relativas de altura significativa (Hs) (retirado de Andrade et al., 2013).	18
Figura 13: Distribuição de frequências relativas do período de pico (Tp) (retirado de Andrade, et al., 2013).	19
Figura 14: Distribuição do rumo de pico de potência (retirado de Andrade et al., 2013).	19
Figura 15: Valores de Hs, Tp e rumo registados na boia Monican (laranja) e ERA5 (azul) para o dia 21/01/2020.....	21
Figura 16: Representação dos valores de altura significativa e período de pico, às 12h do dia 28/12/2020, no decorrer da tempestade Bella. Dados obtidos de https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	22
Figura 17: Galgamento do muro na praia do Sul na Ericeira no dia 28/12/2020 às 12:54h.....	22
Figura 18: Comparação das condições de agitação marítima referentes à tempestade Bella entre os dados da boia Monican (laranja) e do hindcast ERA5 (azul).	23
Figura 19: Danos causados pela tempestade Cristina na praia do Sul na Ericeira (retirada de Santos et al., 2014).....	24
Figura 20: Condições de agitação marítima referentes à tempestade Christina provenientes do hindcast ERA5.	25
Figura 21: Nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (dgt) entre as 12h e as 14h, no dia 21/01/2020.....	25
Figura 22: Previsão dos níveis de maré, segundo o IH, para o dia 28/12/2020.	26
Figura 23: Nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (dgt), no dia 06/01/2014 entre as 18h e as 20h.....	26

Figura 24: Representação da malha batimétrica da área de estudo construída em ArcGis.	27
Figura 25: Representação da batimetria em estudo com o a localização do perfil do COSMO e o perfil da malha usado nas simulações do XBeach.	28
Figura 26: Localização do perfil levantado por GPS na praia do Sul, no dia 21/01/2020.	29
Figura 27: Representação do perfil topográfico da praia do Sul, obtido no dia 21/01/2020.	29
Figura 28: Comparação dos 5 perfis do COSMO representativos da praia do Sul com representação esquemática da areia (a castanho) e da plataforma rochosa (a cinza).	30
Figura 29: Localização do ponto espectral usado no programa SWAN.	32
Figura 30: Localização dos 3 pontos usados no modelo SWAN.	32
Figura 31: Esquema representativo da metodologia na obtenção de resultados.	34
Figura 32: Representação dos 100 espraio medidos sobre o perfil topográfico e localização dos mesmos.	35
Figura 33: Representação das cotas de máximo espraio medidas pelo GPS.	35
Figura 34: Esquema representativo do cálculo do runup.	35
Figura 35: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em XBeach (CS1, CS2, CJ1, CJ2 e CJ3) com as medidas no campo com recurso a GPS para o dia 21/01/2020.	36
Figura 36: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em XBeach para a tempestade Bella.	38
Figura 37: Representação dos valores de CME resultantes da simulação BS1.	39
Figura 38: Variação da CME no COSMO 1 ao longo do intervalo de tempo simulado.	41
Figura 39: Variação da CME no COSMO 2 ao longo do intervalo de tempo simulado.	41
Figura 40: Variação da CME no COSMO 3 ao longo do intervalo de tempo simulado.	42
Figura 41: Variação da CME no COSMO 4 ao longo do intervalo de tempo simulado.	42
Figura 42: Variação da CME no COSMO 5 ao longo do intervalo de tempo simulado.	43
Figura 43: Modelo bidimensional do litoral envolvente da Praia do Sul, Ericeira.	44
Figura 44: Valores de CME obtidos pelo modelo bidimensional.	44
Figura 45: Modelo 2D da praia do Sul e representação nível do mar para num certo instante no tempo.	45
Figura 46: Secção aumentada do modelo bidimensional, destacando o galgamento do molhe situado na Ericeira.	45
Figura 47: Representação dos resultados obtidos com o modelo 2D no instante t=540s da simulação.	46
Figura 48: Galgamento do molhe localizado na praia dos pescadores a norte da praia do Sul, no dia 28/12/2020 por volta das 12:50h.	46
Figura 49: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em XBeach para a tempestade Christina.	47
Figura 50: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHS1.	48
Figura 51: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHJ1.	49
Figura 52: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHS2.	49
Figura 53: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHJ2.	50

Índice de Tabelas

Tabela 1: Exemplos de resultados do modelo XBeach (adaptado de Heleno, 2017).....	15
Tabela 2: Caracterização das condições de agitação junto à costa.	20
Tabela 3: Valores de Hs, Tp e rumo utilizados nas simulações para a campanha de campo, dados provenientes da boia Monican do IH.	20
Tabela 4: Valores de Hs, Tp e rumo utilizados nas simulações para a tempestade Bella, dados provenientes da boia Monican do IH.	23
Tabela 5: Valores de Hs médio, Tp e rumo utilizados nas simulações para a tempestade Christina.....	24
Tabela 6: Valores da agitação marítima ao largo utilizados nas fórmulas empíricas para as 3 condições de estudo.....	31
Tabela 7: Dados da tempestade Christina, Bella e do dia 21/01/2020 para uma profundidade de 21.3 m.	33
Tabela 8: Valores estatísticos referentes à cota do máximo de espraio medida em 100 espraio.	36
Tabela 9: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em XBeach comparando com os valores medidos pelo GPS para o dia 21/01/2020.....	36
Tabela 10: Comparação dos valores de runup estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o XBeach para o dia 21/01/2020.	37
Tabela 11: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em XBeach para a tempestade Bella.	39
Tabela 12: Comparação dos valores de runup estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o XBeach para a tempestade Bella.	40
Tabela 13: Valores máximos de CME obtidos para os 5 perfis do COSMO durante a tempestade Bella.....	43
Tabela 14: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em XBeach para a tempestade Christina.	48
Tabela 15: Comparação dos valores de runup estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o XBeach para a tempestade Christina.....	50

Abreviaturas

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CME	Cota de máximo espraio
DGT	Direção Geral do Território
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
GPS-RTK	<i>Global Positioning Systems - Real-Time Kinematic</i>
IH	Instituto Hidrográfico
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MA	Maré Astronómica
NMM	Nível Médio do Mar
POC	Programas da Orla Costeira
SM	Sobre-elevação Meteorológica
SWAN	<i>Simulating WAVes Nearshore</i>
SWASH	<i>Simulating Waves till SHore</i>
XBEACH	<i>Extreme Beach Erosion</i>
ZH	Zero Hidrográfico

1. Introdução

1.1. Enquadramento do trabalho

A zona costeira de Portugal é habitada por 3/4 da população portuguesa, sendo que esta contribui para a geração de 85% do PIB (Produto Interno Bruto), representando uma elevada importância a níveis ambientais, sociais, culturais, económicos e recreativos (APA, 2012).

A pressão humana está a causar alterações sem precedentes no ambiente costeiro, pelo que é necessário o desenvolvimento de medidas que valorizem os seus recursos socioeconómicos, mas também que promovam a proteção dos ecossistemas e dos valores ambientais litorais, contribuindo, de modo geral, para melhorar a qualidade do ambiente costeiro (APA, 2012). Entre estas medidas incluem-se as relacionadas com o aumento do conhecimento sobre o risco costeiro, em particular com o risco de erosão, galgamento e inundação oceânica. O estudo e a prevenção do risco contribuirão para a diminuição de elevados prejuízos causados na sequência de tempestades. Por exemplo, segundo o relatório técnico com o registo das ocorrências no litoral elaborado pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente) em 2014 (Pinto, 2014) foram contabilizados cerca de 16.5 de milhões de euros em prejuízos provocados pela tempestade *Christina* ao longo do litoral português.

Em grande parte das situações a avaliação do galgamento é efetuada recorrendo a fórmulas empíricas de fácil aplicação, mas com resultados que nem sempre são compatíveis com a observação. Resultados recentes obtidos por Ferreira (2018) mostram que as ferramentas empíricas de previsão do galgamento não têm aplicação global, necessitando de parametrização caso a caso. Neste trabalho, Ferreira (2018) sugere que a generalização de uma metodologia para avaliação do potencial de galgamento, a um leque alargado de contextos geomorfológicos, beneficiaria da aplicação de modelos numéricos de propagação da onda rebentada até ao limite do alcance do espraio. Neste tipo de modelos podem ser incluídos os modelos numéricos SWASH (*Simulating Waves till Shore*) e XBeach (*Extreme Beach Erosion*).

Até ao momento, a maior parte dos trabalhos focou-se no estudo de praias arenosas, pelo que o conhecimento sobre os processos de galgamento em contexto de litoral rochoso é ainda mais incipiente. Neste sentido, neste trabalho optou-se pela escolha de uma praia encaixada, num contexto geomorfológico particular, onde a praia se desenvolve sobre uma plataforma rochosa.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste em explorar a aplicação e avaliar o desempenho do modelo numérico (*XBeach*) de previsão do efeito de tempestades marítimas no galgamento de zonas costeiras em praias encaixadas. Este trabalho enquadra-se no âmbito da geologia do ambiente, dos processos costeiros e do ordenamento do território com o intuito de contribuir para aumentar o conhecimento científico sobre vulnerabilidade da faixa costeira associada a processos de galgamento e inundação.

1.3. Estrutura da Dissertação

Este trabalho é composto por sete capítulos que são enumerados de seguida:

Introdução: Enquadramento da dissertação, onde se apresenta a motivação e os objetivos para este trabalho.

Conceitos: Descrição de alguns conceitos importantes utilizados ao longo do trabalho, facilitando assim a compreensão de certas terminologias, como o galgamento e o *runup*.

Metodologia: Abordagem das metodologias seguidas ao longo da dissertação, distinguindo-se duas principais para o cálculo do *runup*: modelos analíticos e modelos numéricos.

Caso de estudo: Descrição geomorfológica e geográfica da área de estudo e caracterização da agitação marítima ao largo e junto à costa. Representação de perfis topo-batimétricos e da malha batimétrica criada para a modelação. Também se descrevem os fenómenos de tempestade que atingiram o litoral em estudo e que foram objeto de simulação.

Condições de aplicação: Exposição das condições de aplicação dos modelos utilizados, nomeadamente os parâmetros utilizados nas simulações.

Resultados: Apresentação e comparação dos resultados obtidos para a cota de máximo espraio e *runup*, através das metodologias referidas e avaliação do desempenho do modelo *XBeach*.

Conclusões: Apresentação das conclusões obtidas neste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. Conceitos

2.1. Galgamento e inundação

O galgamento e a inundação costeira ocorrem quando há transposição da água do mar sobre barreiras de proteção do litoral naturais ou artificiais, provocando submersão ocasional ou prolongada das áreas adjacentes.

A cota de máximo espraio (CME) é determinada pelo somatório do nível do mar e do *runup* (R). Por sua vez, o nível do mar resulta da soma da maré astronômica (MA) e da sobre-elevação meteorológica (SM). O valor de *runup* corresponde à distância vertical entre a cota mais elevada atingida pelo espraio da onda (E) e o *wave set-up* (empilhamento de água junto à costa) induzido pelas ondas de vento (S), como exemplificado na Figura 1.

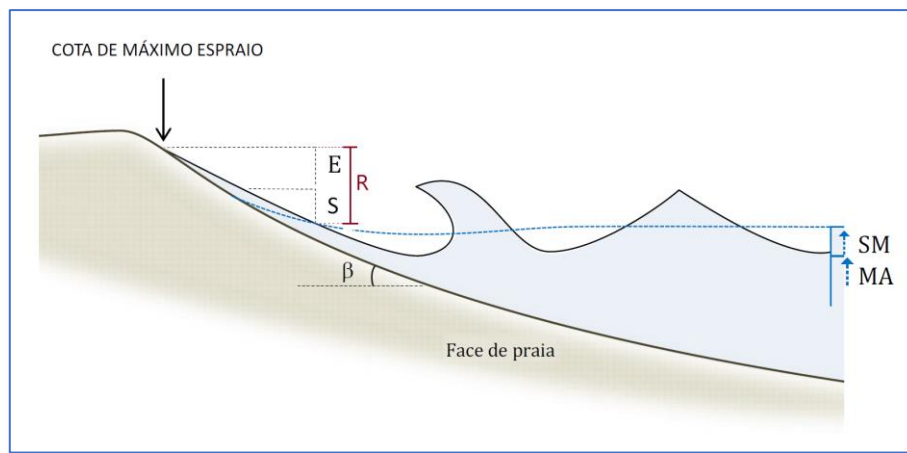


Figura 1: Esquema ilustrativo das várias componentes que determinam a cota de máximo espraio (adaptado de Silva et al., 2013).

O alcance do espraio das ondas depende das suas características, bem como da morfologia da praia que influencia a distância percorrida e da cota atingida pelo espraio. Assim, o cálculo da cota de máximo espraio é complexo e depende não só do conhecimento dos fatores forçadores mas também da morfologia litoral e da plataforma continental, bem como das respectivas interações. Segundo Komar (1976), o *runup* e o galgamento são ainda influenciados pela composição e dimensão das partículas sedimentares que constituem a praia.

2.2. Ondas e nível do mar

As ondas estão associadas a diferentes processos de geração podendo ter origem atmosférica, astronómica ou tectónica (Ferreira, 2018). Neste trabalho são consideradas a sobre-elevação meteorológica (*storm surge*), as ondas de vento e a maré.

As ondas de vento são geralmente caracterizadas através dos seguintes parâmetros, segundo Ferreira (2018):

- Altura de onda (H): Distância vertical entre a crista e cava da onda. Considerando que um conjunto de ondas apresenta uma natureza irregular, a estatística mais utilizada é a da altura significativa (H_s), que corresponde à média do terço das alturas das ondas mais altas observadas durante um certo intervalo de tempo. O seu valor estatístico é o que melhor se aproxima das estimativas visuais que um observador experimentado faz do estado do mar, possibilitando assim a utilização de registos não instrumentais.
- Comprimento de onda (L): Distância entre duas cristas (ou quaisquer outros dois pontos na mesma fase) consecutivas. L_0 é a designação do comprimento de onda ao largo, isto é, em águas profundas.
- Período da onda (T): Tempo necessário para que uma onda percorra a distância de um comprimento de onda. Uma das estatísticas mais utilizadas é o período de pico potência (T_p).
- Rumo da onda (Dir): O rumo da onda é medido em graus, em relação ao norte, com valor positivo no sentido horário.

Na zona da rebentação as variações da superfície livre do mar podem ser divididas em três componentes: a componente infragravítica, caracterizada por oscilações de longo período (>30 s) que provocam variações consideráveis no alcance do espraio; a componente gravítica, que é representada pela agitação incidente com períodos mais curtos (<30 s), sendo facilmente identificada através de observações diretas; e o *set-up* que corresponde ao aumento do nível médio do mar na zona da rebentação devido à agitação marítima. Na Figura 2 estão representadas estas três componentes da superfície livre junto à costa.

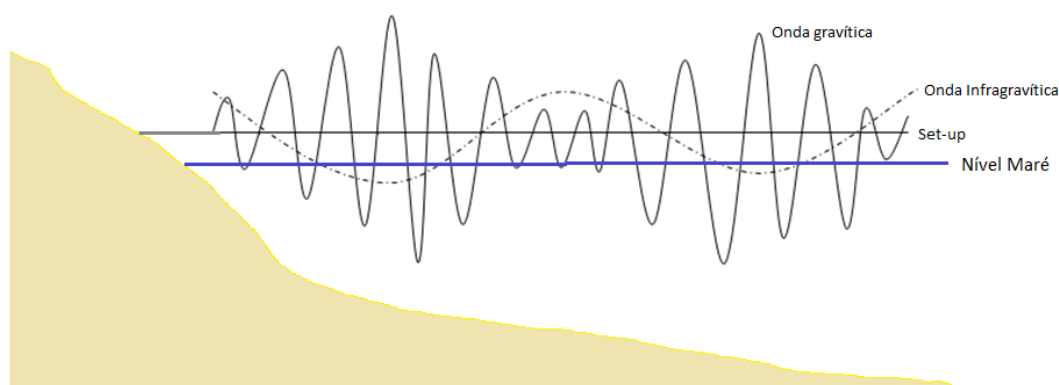


Figura 2: Esquema representativo das diversas componentes das ondas (retirado de Hermínio, 2015).

A componente infragravítica geralmente apresenta maior amplitude em condições de tempestade, maximizando as cotas atingidas pelo espraio das ondas gravíticas, sendo esta uma componente importante nos cálculos da CME e do *runup*.

2.3. Geomorfologia de praias sobre plataforma rochosa

Na Figura 3 está representado um perfil típico de uma praia que se desenvolve sobre uma plataforma rochosa onde se destacam duas zonas principais: a praia emersa e a praia submersa.

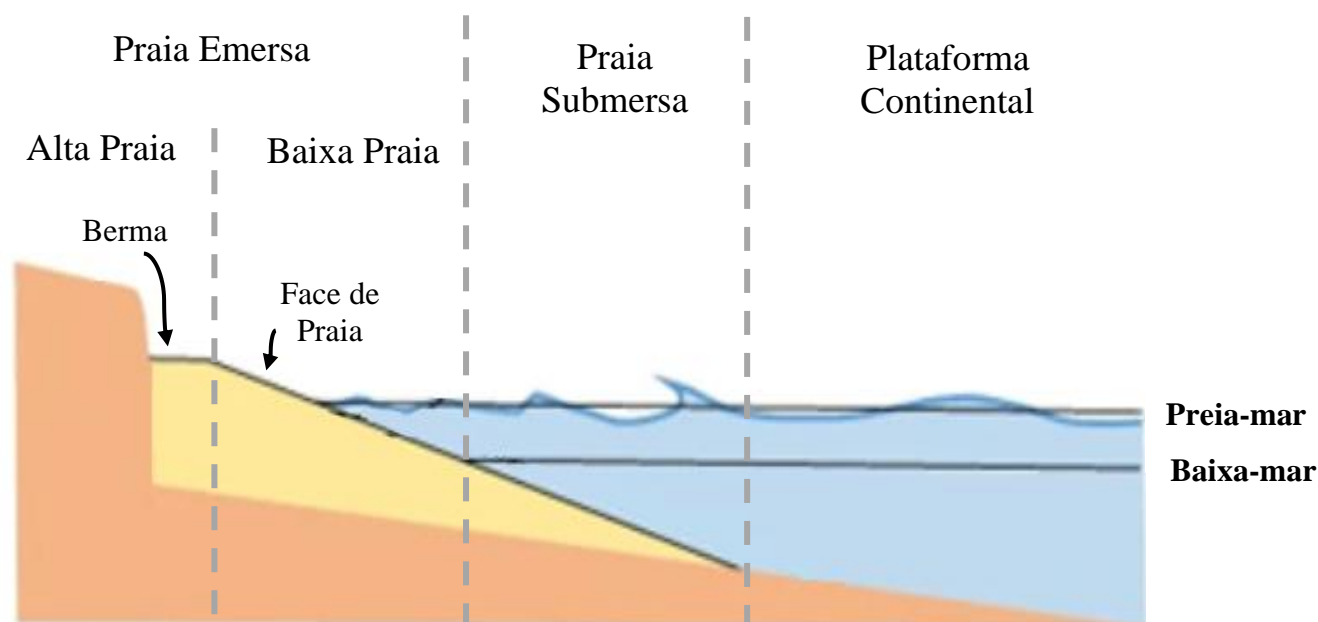


Figura 3: Representação esquemática de um perfil típico de praia sobre plataforma rochosa (Adaptado de Taborda e Ribeiro, 2015).

A praia submersa é a zona da praia que está sempre inundada pelo mar. É limitada superiormente pelo nível de baixa-mar e estende-se até ao início da plataforma continental. Nesta zona ocorrem interações importantes entre as ondas e os fundos marinhos como o empolamento e a rebentação da onda.

A praia emersa é dividida em duas secções: baixa-praia e a alta-praia.

A baixa-praia (*foreshore*) é uma porção inclinada do perfil de praia entre a crista da berma ou o limite superior da zona de espraio das ondas na preia-mar, e o nível da baixa-mar. Esta é a zona mais ativa da praia que é constantemente atuada pelas ondas e marés.

A alta-praia (*backshore*), que pode não existir, é a zona superior da praia que geralmente não sofre atuação das ondas e como tal a areia está normalmente seca. A maior parte das vezes é constituída por bermas de praia formadas em associação com temporais.

A divisão das secções da praia não é consensual entre os vários autores, dificultando também o consenso na definição de face de praia, bem como o cálculo do declive a utilizar nas fórmulas existentes para o cálculo do *runup*. Para Guza e Inman (1975), o declive é denominado como sendo “*beach slope*”, enquanto para Komar (1976) o declive é referido como sendo “*beach face slope*”, já Larson et al. (2004) designa o declive como sendo “*foreshore slope*”, no entanto Stockdon et al. (2006) refere-se como sendo “*beach steepness*”, mais recentemente Sutherland (2010) considera “*coastal slope*”, como sendo o declive de praia.

As praias desenvolvidas sobre uma plataforma rochosa são normalmente caracterizadas pela existência de bermas proeminentes e faces de praia com grande inclinação, como se representa na Figura 3.

3. Métodos

Neste capítulo são descritas as estratégias de modelação que foram utilizadas neste trabalho para calcular a cota de máximo espraio e os valores de *runup*. Na Figura 4 estão esquematizadas as diferentes metodologias utilizadas que são descritas nos subcapítulos seguintes.

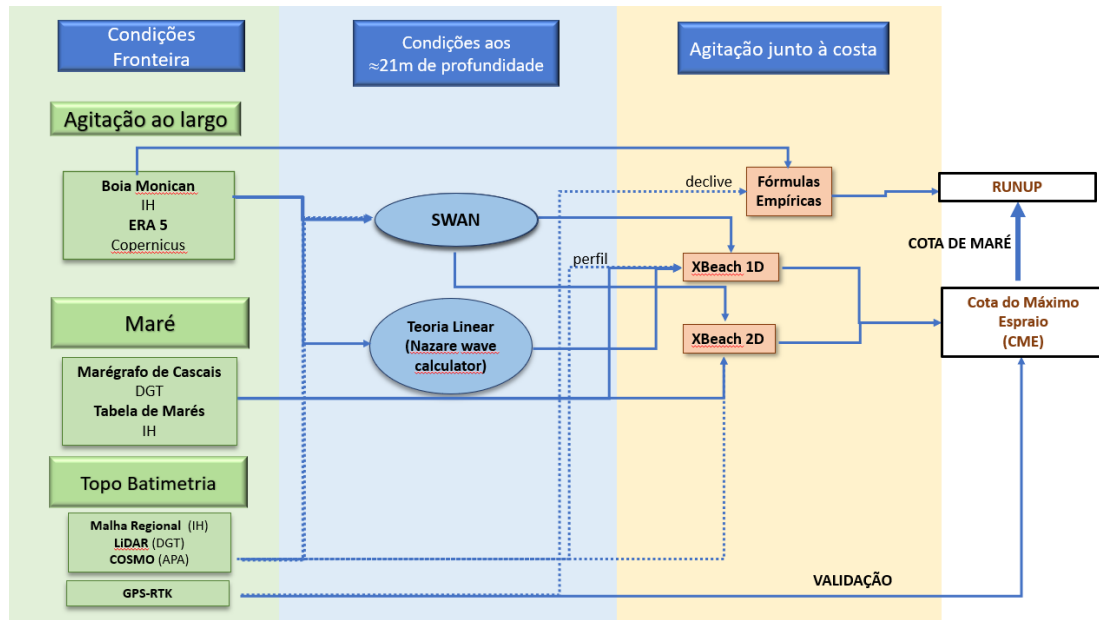


Figura 4: Esquema representativo da metodologia utilizada nesta dissertação.

3.1. Modelos analíticos para o cálculo do *runup*

Ao longo do tempo, vários autores têm proposto diversos modelos analíticos com intuito de estimar o *runup* em praias, recorrendo a simplificações morfológicas e com diferentes parâmetros e coeficientes. Estas formulações são baseadas em ensaios laboratoriais e/ou medições realizadas *in situ*. O valor do *runup* característico é calculado com base em parâmetros estatísticos, como por exemplo: o *runup* máximo (R_{max}) correspondendo ao espraio que atinja a maior cota; *runup* significativo (R_s) que corresponde à média do terço dos valores mais altos de *runup*; e o mais utilizado, o percentil de *runup* 2% ($R_{2\%}$) correspondendo ao valor que apenas é excedido por 2% das observações. Nesta dissertação são analisados alguns modelos analíticos mais utilizados.

Hunt (1959) realizou um estudo em praias com enrocamentos, através de um modelo físico laboratorial com estruturas, onde conclui que o *runup* também depende do declive da zona de espraio ($\tan\beta$), representado na equação (3.1):

$$R_{2\%} = 8H_s \times \tan\beta \quad (3.1)$$

Guza e Thornton (1982) desenvolveram uma relação linear entre o valor do *runup* significativo e altura significativa da onda, a partir de dados recolhidos nas praias da Califórnia, representado pela equação (3.2):

$$R_S = 0.7 \times H_S \quad (3.2)$$

Mase e Iwagaki (1984) realizaram testes de *runup* em laboratório com estruturas impermeáveis orientadas para o estudo de ondas irregulares na Universidade de Kyoto. Os autores verificaram que o número de espraços diminui em relação ao número de ondas incidentes. A razão entre o número de espraços e o número de ondas oscilava entre 0.2 a 0.9, sendo que os valores mais baixos ocorriam em praias de menores declives. Mase e Iwagaki observaram que os espraços com maior *runup* ocorrem geralmente isolados, uma vez que não sofrem redução do seu alcance devido à interferência da ressaca com outros espraços, tendo apresentado a equação (3.3):

$$R_{2\%} = 1.86 \times H_S \times \xi_0^{0.71} \quad (3.3)$$

em que ξ_0 é o número de Iribarren, $\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{(H_S/L_0)}$, onde L_0 corresponde ao comprimento de onda ao largo ($L_0 = 1.56 \times T p^2$) e H_S a altura significativa.

Holman (1986) avaliou a existência de valores extremos de *runup*, em praias naturais. Uma vez que estes resultados foram obtidos num só local, em Duck, Carolina do Norte, é aconselhável que seja aplicado em condições semelhantes ao local estudado. O autor conclui que a determinação do *runup* deve ser feita através do número de Iribarren e dos coeficientes de regressão obtidos em ensaios laboratoriais, apresentando a equação (3.4):

$$R_{2\%} = 0.92 \times H_S \times \xi_0 \quad (3.4)$$

Van der Meer (1988) apresenta um modelo do perfil dinâmico da praia durante uma tempestade que depende do período, altura e ângulo de ataque da onda, tamanho do grão e profundidade da água. O modelo expressa a altura da crista da berma que poderá ser interpretado como uma estimativa de *runup* máximo.

Ruggiero *et al.* (2001) avaliaram a sensibilidade das zonas costeiras quanto à erosão provocada pela agitação marítima, recorrendo à análise da probabilidade da ocorrência de valores extremos do nível do mar devido à influência de fenómenos atmosféricos, oceanográficos e de *runup*. Este tem a capacidade de relacionar o *runup* com a morfologia da praia e com as condições das ondas, como demonstrado pelas equações (3.5) e (3.6):

$$R_{2\%} = 0.27(\tan \beta \times H_0 \times L_0)^{0.5} \quad \text{praias dissipativas} \quad (3.5)$$

$$R_{2\%} = 0.5 \times H_0 - 0.22 \quad \text{praias dissipativas a refletivas} \quad (3.6)$$

Masselink e Hughes (2003) apresentam um modelo para o cálculo do *runup* que relaciona uma constante empírica (K) com a altura significativa, o período da onda e o declive da praia, representado na equação (3.7):

$$R_{2\%} = K \times \sqrt{H_S \times 1.56 \times T_p^2} \times \tan\beta \quad (3.7)$$

Stockdon *et al.* (2006), baseando-se no trabalho de Holman (1986), desenvolveu um modelo que avalia o *runup* em praias naturais. Os autores consideraram dois processos distintos para o cálculo do *runup*: o *setup* e o espraio. O “*setup*” é parametrizado recorrendo ao número de Iribaren e o espraio é parametrizado recorrendo a bandas de frequências infragravíticas. Concluíram que os valores de “*setup*” são sempre menores para praias dissipativas do que para qualquer outro tipo de perfil de praia (refletivo ou intermédio).

Estes autores propõem a seguinte equação para o cálculo do *runup* (3.8):

$$R_{2\%} = 1.1 \left[0.35 \times \tan\beta \times (H_S \times L_0)^{\frac{1}{2}} + \frac{[H_S \times L_0 (0.563 \times (\tan\beta)^2 + 0.004)]^{\frac{1}{2}}}{2} \right] \quad (3.8)$$

Teixeira (2009) desenvolveu um modelo para o cálculo do *runup* onde utilizou as cotas das linhas de preia-mar impressas no areal em várias praias do litoral algarvio. As formulações relacionam linearmente a altura de onda e a altura do *runup*, assim sendo o *runup* máximo foi calculado, em cada observação, a partir da diferença entre a cota da linha de maré marcada no areal e a cota de preia-mar prevista nas tabelas de maré, publicadas pelo IH (Instituto Hidrográfico). Segundo o autor o *runup* máximo é expresso pela seguinte equação (3.9):

$$R_{\text{máx}} = 0.80 \times H_S + 0.62 \quad (3.9)$$

Como referido anteriormente, as aproximações utilizadas para estimar o declive não são consensuais, como tal a definição e medição da inclinação da praia são distintos entre os autores. Por exemplo, Stockdon *et al.* (2006) referem que "A definição de uma inclinação única da praia torna-se difícil em praias naturais com perfis tipicamente côncavos e é ainda mais complicada pela presença de barras", tal como Nielsen e Hanslow (1991) que consideram que "A primeira dificuldade adicional apresentada pelas praias naturais é, portanto, o significado do termo «inclinação da praia» não ser consensual.". Também Makaske e Augustinus (1998) afirmam que "Perfis de praia com inclinações médias semelhantes podem ter diferentes configurações, que devem ser consideradas quando se estuda a resposta da praia..." (Herminio, 2015).

Assim, para o cálculo do declive, o limite terrestre pode corresponder à crista da berma, à base da duna ou o local até onde o espraio se propaga; o limite oceânico também é variável, podendo corresponder à zona da rebentação, ao nível médio do mar ou ao nível do mar sobre o qual as ondas atuam sobre o perfil da praia. Esta dificuldade na delimitação do declive tem consequências na utilização das fórmulas de *runup*. A utilização de um declive médio da zona de espraio para o cálculo do *runup*, pode originar valores de alcance verticais significativamente diferentes aos observados. Estes valores dependem do tipo de praia em estudo: em praias dissipativas, a inclinação da zona de espraio é mais baixa, permitindo que o alcance horizontal do espraio seja superior ao do alcance vertical, sendo que existe neste tipo de praias uma tendência para o valor de *runup* ser subestimado em condições de tempestade. Por outro lado, as praias do tipo refletivas têm uma face de praia com maior inclinação, fazendo com que o espraio atinja rapidamente cotas

mais elevadas e por isso, os valores de *runup* tendem em ser sobrestimados em condições de tempestade (Hermínio, 2015) (Figura 5).

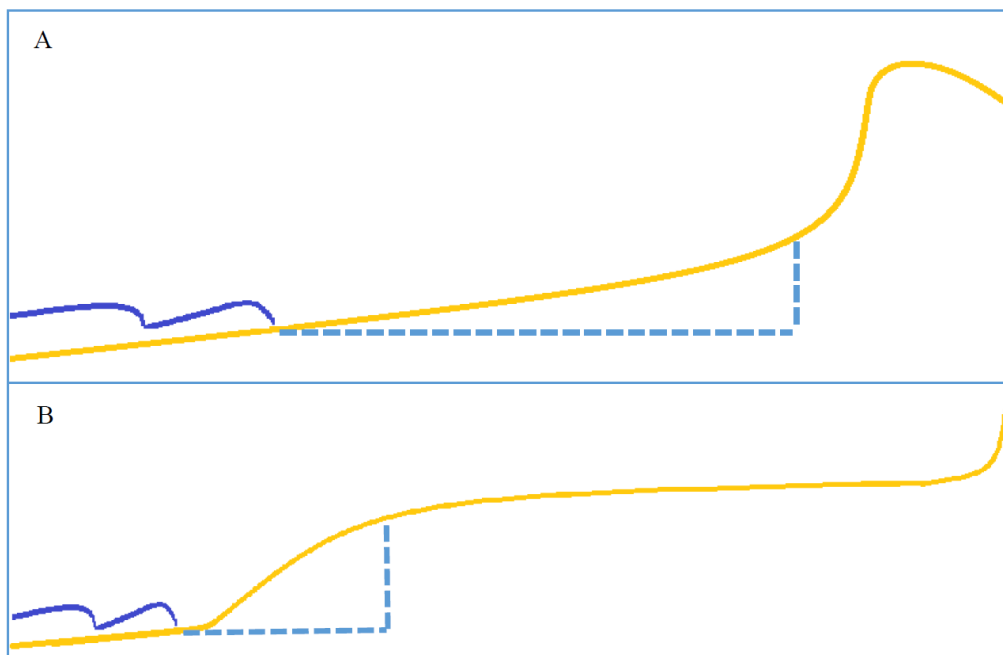


Figura 5: A) *runup* subestimado; B) *runup* sobrestimado (retirado de Hermínio, 2015).

Segundo Hermínio (2015), “as praias com uma morfologia irregular demonstram que o alcance vertical e horizontal do espraio de uma onda varia consoante o declive e a largura de cada segmento da praia emersa”. Deste modo, a utilização de um valor constante de declive representativo da zona em estudo não é o mais adequado para a determinação do *runup*, pelo que têm sido desenvolvidas novas estratégias para praias com declives compostos. Estas limitações dos modelos analíticos têm também sido ultrapassadas através da utilização de modelos numéricos, como por exemplo o *XBeach*, que são teoricamente adequados para estimar o *runup* em perfis com configuração arbitrária.

3.2. Propagação da agitação marítima

Para conseguir estimar adequadamente o espraio é frequentemente necessário conhecer as características da agitação marítima junto à costa. Existe uma grande variedade de aproximações e modelos adequados para o efeito, sugerindo-se a consulta do trabalho de Ferreira (2018) para uma síntese. Neste trabalho utilizaram-se os modelos numéricos *XBeach* e o *SWAN*, bem como a teoria linear com recurso à ferramenta *Nazare wave calculator* (Carapuço, 2015).

3.2.1. Propagação da agitação através da teoria linear

Neste trabalho utilizou-se uma aproximação baseada na teoria linear para a propagação da agitação marítima, o que tem a vantagem de facilitar a rapidez com que a informação necessária é obtida. A *Nazare wave calculator* é uma ferramenta criada no âmbito do projeto “A Onda da Nazaré: um estímulo para a aprendizagem”, em cooperação com vários docentes da FCUL (Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa) e alunos e professores da Escola Secundária de Gama Barros (Carapuço, 2015). Nesta “calculadora” é possível inserir os parâmetros das ondas ao largo e calculá-los para uma profundidade específica e/ou para a zona da rebentação. Esta

ferramenta é um excelente contributo para uma análise simplificada das condições de agitação marítima estudadas.

3.2.2. SWAN

Nesta dissertação é usado um modelo de geração, propagação e dissipação da agitação marítima irregular para simular a propagação marítima na costa noroeste portuguesa.

O modelo escolhido é o SWAN (Booij *et al.*, 1999) desenvolvido pela Universidade Técnica de Delft (TUDelft) na Holanda. Este modelo permite obter parâmetros de agitação marítima em águas pouco profundas. Simula a geração e a propagação das ondas de gravidade geradas pelo vento na superfície livre do mar na zona costeira, desde a plataforma continental até à zona de rebentação. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direcional e calcula a evolução das ondas geradas pelo vento a qualquer escala, desde oceanos até às zonas costeiras, bem como em lagos e estuários a partir do conhecimento das condições de fronteira, batimetria, correntes e campos de ventos. Os resultados provêm dos valores de alturas significativa, períodos de pico e direções médias espectrais na zona em estudo, representada por uma malha, para além do espectro direcional em cada ponto do domínio (Faria, 2009).

Neste modelo são implementados processos físicos presentes na propagação da agitação marítima, tais como:

- Propagação da agitação no espaço geográfico;
- Refração e empolamento devidos à variação da profundidade e correntes;
- Reflexões devidas a correntes opostas.

Segundo Faria (2009), este modelo é excelente na modelação de ondas oceânicas embora tenha as suas limitações. Por exemplo, não é capaz de modelar de forma direta a difração causada pela presença de obstáculos, por isso não deve ser usado em áreas onde a variação da altura da onda ao longo da crista é elevada em relação ao comprimento de onda. Assim sendo, os resultados obtidos pelo modelo SWAN em zonas onde a difração pode ser relevante (portos ou obstáculos transversais à direção de propagação da onda) podem apresentar desvios significativos relativamente aos valores reais.

O SWAN pode ser usado em modo estacionário e em modo não estacionário, sendo que a utilização do modo estacionário é recomendada para situações em que o tempo que as ondas demoram a percorrer a área em estudo seja menor relativamente às variações nas condições fronteira (SWAN, 2020).

Em Portugal, este modelo tem sido aplicado com sucesso a numerosas situações (e.g. Sampaio, 2008; Faria, 2009; Silveira *et al.*, 2013).

3.2.3. XBeach

O *XBeach* (Roelvink *et al.*, 2010) é um modelo numérico de código aberto desenvolvido primeiramente para simular o impacto de tempestades extremas e furacões em costas arenosas. Tem sido desenvolvido e financiado por parte do *United States Army Corps of Engineers*, do *Rijkswaterstaat* e da União Europeia, apoiada pelo *UNESCO-IHE*, pela *Deltares*, pela *Delft University of Technology* e pela *University of Miami*.

Em Portugal, Vousdoukas *et al.* (2011) utilizou o modelo *XBeach* para o estudo da erosão e galgamentos nas ilhas barreira da Ria Formosa, Faro, tendo concluído que embora as previsões para o perfil costeiro fossem consistentes, os valores de erosão na zona subaérea e os de deposição, na parte submersa, eram ambos sobrestimados. Também, Oliveira (2012) avaliou o modelo *XBeach*, respetivamente à erosão de praias de dunas para condições de tempestade, comparando com o modelo *Litprof* (DHI, 2008) e o modelo *Duner* (Oliveira, 2012). A erosão do perfil de praia foi estudada através de um modelo criado em laboratório. Dos três modelos testados, o *XBeach* foi aquele que apresentou o melhor desempenho para a erosão da duna e respetivo recuo do perfil de praia. Considerando os parâmetros calibrados, os resultados ainda se assemelham mais à configuração do perfil experimental. Heleno (2017) utilizou o modelo *XBeach* na avaliação do espraiamento e inundação em praias da Costa da Caparica.

Este modelo distingue-se pela sua capacidade de simular o transporte de sedimentos e alteração morfológica devido a tempestades, em áreas costeiras, praias, dunas e ilhas barreira.

O modelo inclui processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos. Nos processos hidrodinâmicos englobam-se processos de transformação de ondas longas (geração, propagação e dissipação), transformação de ondas curtas (empolamento, refração e rebentação), configuração do fundo induzida pelas ondas e pelas correntes variáveis e por fim o galgamento e inundação em zonas costeiras. Nos processos morfodinâmicos incluem-se escorregamento do talude de dunas, alteração do fundo, erosão localizada da duna e o transporte de sedimentos por arraste ou suspensão. Também estão incluídos efeitos de amortecimento devido à presença de vegetação e de estruturas não erodíveis (Roelvink *et al.*, 2015).

O *XBeach* funciona com dois modos: o hidrostático e não hidrostático. O modo hidrostático resolve a variação de amplitude das ondas curtas separadamente das ondas longas, das correntes e das alterações morfológicas, poupando tempo no processamento de dados, visto que a fase das ondas curtas não é simulada. O modo não hidrostático é mais completo resolvendo todos os processos, mesmo os relacionados com as ondas curtas (Roelvink *et al.*, 2015). Este modelo é mais demorado devido à exigência computacional. Foi desenvolvido inicialmente como uma versão do modelo SWASH (Zijlema *et al.*, 2011).

Na Figura 6 está representado a propagação das ondas na costa, recorrendo ao modelo *XBeach* no modo hidrostático (imagem superior) e no modo não hidrostático (imagem inferior). No modo hidrostático, o nível médio da água está representado a azul claro, incluindo os movimentos do nível do mar e das ondas longas, enquanto a azul escuro estão representadas as ondas curtas como sendo a energia de onda que é resolvida na escala de grupo de onda. No modo não hidrostático estão representados todas as ondas e movimentos da água, onde as ondas curtas e as longas, e o nível do mar são resolvidos integralmente (Heleno, 2017).

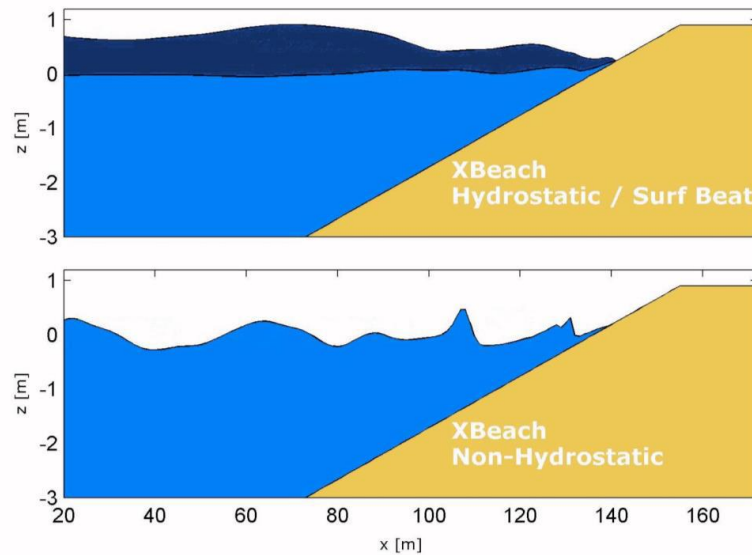


Figura 6: Propagação das ondas no modo hidrostático (imagem superior) e no modo não hidrostático (imagem inferior) no XBeach (retirado de Heleno, 2017).

3.2.3.1. Processos físicos

O *XBeach* permite ao utilizador seleccionar os processos que o modelo deve considerar na simulação, consoante o objetivo da simulação. O modelo inclui uma diversidade de processos físicos como a propagação da agitação marítima ou alterações morfológicas do perfil de praia.

Alguns dos processos físicos ativados por omissão são a propagação das ondas curtas (*swave*), a instabilização do talude do fundo (*avalanching*), o escoamento (*flow*), o transporte de sedimentos (*sedtrans*). Por outro lado, os processos desativados por omissão são o modo não hidrostático (*nonh*), o espraio de ondas curtas (*swrunup*) ou a interação temporal da batimetria (*setbathy*) (Roelvink *et al.*, 2015). Todos estes processos podem ser ativados pelo utilizador.

A ativação do modo não hidrostático, através da palavra-chave *nonh*, faz com que o modelo calcule as ondas curtas, recorrendo a equações não lineares para águas pouco profundas, desativando automaticamente a equação de balanço da ação das ondas (*swave*). O modelo calcula valores médios na coluna de água para o escoamento, devido às ondas e correntes utilizando as equações para águas pouco profundas, englobando a variação da pressão não hidrostática (Heleno, 2017).

3.2.3.2. Dados de entrada

No manual do *XBeach* (Roelvink *et al.*, 2015) podem ser encontrados todos os dados de entrada suportados pelo modelo. Neste subcapítulo são mencionados os ficheiros inseridos no presente trabalho, nomeadamente:

- Malha batimétrica da zona em estudo (modo 2D);
- Perfil batimétrico em estudo (modo 1D);
- Condições da agitação marítima incidente (espectros do SWAN ou parâmetros de um espectro de *JONSWAP*);
- Nível do mar (cota de maré + sobre-elevação);

O *XBeach* usa um sistema de coordenadas em que o eixo do x é orientado em direção à costa, aproximadamente perpendicular ao litoral, enquanto o eixo do y é paralelo à costa. A grelha que define a região em estudo é retangular e caracteriza-se pelo número de espaçamentos (nx e ny) entre os pontos no eixo das abcissas (x) e das ordenadas (y) que são distribuídos em espaços variáveis a partir de um ponto de origem (x_{ori}, y_{ori}), podendo os eixos serem rodados consoante um determinado ângulo (α), como se observa na Figura 7.

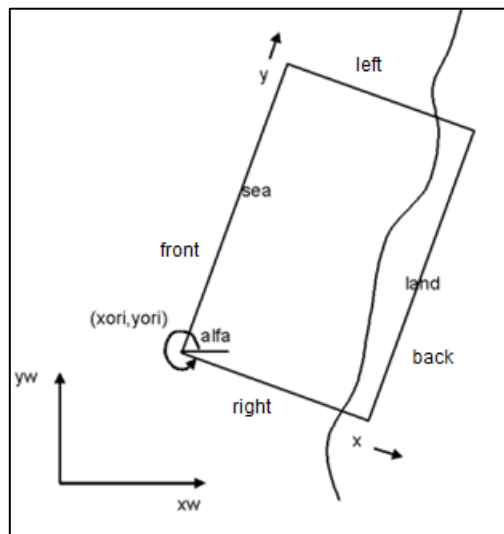


Figura 7: Grelha do domínio no *XBeach* (retirado Roelvink *et al.*, 2010).

Na Figura 8 está representada a grelha onde é expressa a direção da propagação das ondas, sendo definida por um intervalo ($dtheta$) de ângulos ($thetamin$ e $thetamax$) entre os quais as ondas se podem propagar.

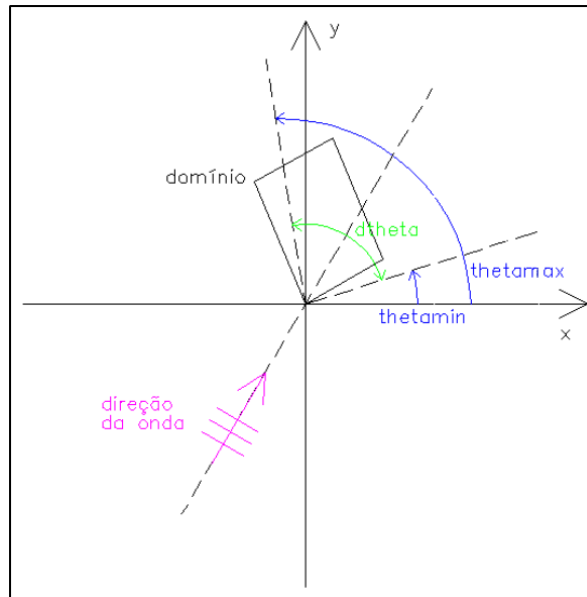


Figura 8: Grelha definidora das direções das ondas no XBeach (retirado de Bieman, 2013).

Os dados relativos à batimetria são fornecidos por um ficheiro externo (*bed.dep*), acompanhado por outros dois ficheiros (*x.grd* e *y.grd*) que identificam as coordenadas do ponto a que a profundidade (*bed.dep*) corresponde (estes ficheiros só são necessários para malhas com espaçamento variável).

As condições de fronteira também são definidas pelo tipo de agitação marítima, seja ela espectral, não espectral ou especial, mas também pela variação do nível do mar ao longo do tempo que pode ser imposta numa fronteira ou até nas quatro (Roelvink *et al.*, 2015). Também é possível definir o nível de maré, nas fronteiras. Neste caso optou-se por considerar constante ao longo do tempo, assumindo o valor da cota da preia-mar observada durante o temporal.

O tempo de simulação, escolhido pelo utilizador, corresponde a um intervalo de tempo a que se sujeita as condições do modelo.

3.2.3.3. Dados de saída

Os resultados obtidos pela simulação são escolhidos pelo utilizador e definidos no ficheiro (*params*), recorrendo à palavra-chave que os identifica. Na Tabela 1 estão representados alguns tipos de *output* obtidos pelo *XBeach*, embora o modelo tenha a capacidade de produzir outras grandezas (Roelvink *et al.*, 2015). Neste trabalho apenas se analisou o *zb* e o *zs*.

Tabela 1: Exemplos de resultados do modelo *XBeach* (adaptado de Heleno, 2017).

<i>Output</i>	
Keyword	Descrição
zb (m)	cota do fundo
zs (m)	cota da superfície livre
H (m)	altura média quadrática das ondas
E (Nm/m ²)	energia de onda

O modelo produz 4 ficheiros após o fim de cada simulação. Um ficheiro contém os resultados obtidos na simulação que será lido posteriormente (*xboutput.nc*), outro ficheiro com o registo dos dados usados e onde se representam os valores dos parâmetros utilizados e os processos físicos considerados (*XBlog.txt*), um ficheiro com recomendações dos autores do modelo quando são inseridos dados fora dos intervalos recomendados (*XBwarning.txt*) e por último, um ficheiro com os erros (*XBerror.txt*), caso existam. Neste último caso, a simulação é interrompida imediatamente.

Na Figura 9 é possível observar um diagrama com a esquematização do funcionamento do *XBeach*.

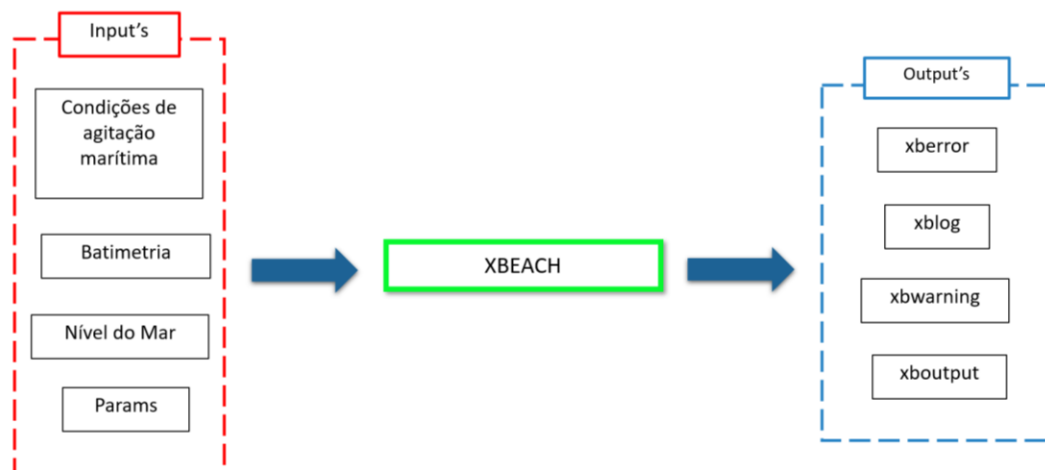


Figura 9: Esquema ilustrativo do funcionamento do modelo *XBeach* (adaptado de Heleno, 2017).

4. Caso de Estudo

4.1. Enquadramento geográfico e geomorfológico

O estudo incidirá sobre a praia do Sul ou praia da Baleia situada na freguesia da Ericeira, concelho de Mafra (Figura 10). De acordo com o POC (Programas da Orla Costeira) é uma praia do tipo I, ou seja, uma praia urbana com uso intensivo, adjacente a um núcleo urbano com forte procura.



Figura 10: Enquadramento geográfico da praia do Sul, Ericeira.

É uma praia encaixada entre estruturas costeiras, formada na base de uma arribas com idade Cretácica com uma extensão de aproximadamente 500 m e uma largura entre os 15 m e os 35 m. É limitada a norte pelo hotel Vila Galé Ericeira, onde se forma uma piscina natural de água salgada na maré baixa. A praia é dividida na zona central por uma espécie de pontão, onde se destacam formações rochosas e sedimentos grosseiros na secção norte enquanto na secção a sul a areia é menos grosseira e as estruturas rochosas afloram a cotas mais baixas. A sul, a praia é limitada por um pequeno esporão que separa a praia de uma plataforma carbonatada, como se observa na Figura 11 e que se estende até à praia da Foz do Lizandro. No lado terrestre é limitada por um passeio marítimo cuja face passa de côncava, a norte, a retilínea no centro e sul da praia, com enrocamento na base na zona central. A plataforma rochosa sobre a qual a praia se desenvolve encontra-se exposta durante a baixa-mar (Silveira, 2013).

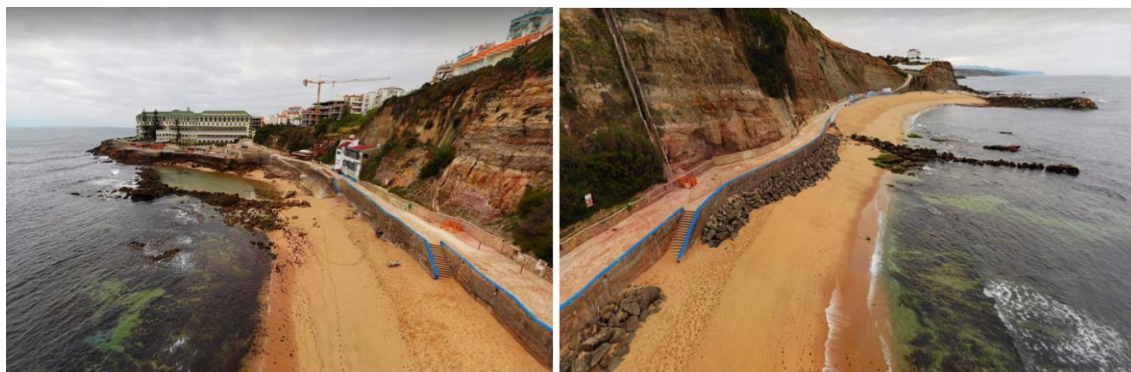


Figura 11: Fotografia da praia do Sul, evidenciando a plataforma rochosa submersa e o passeio marítimo que limita a praia do lado terrestre.

Segundo Silveira (2013) a variabilidade morfológica da praia é reduzida em resultado do efeito de abrigo promovido pela existência do quebra-mar (molhe) do porto de pesca da Ericeira a norte. As variações dos perfis ocorrem paralelamente a si próprios, ou seja, não há trocas sedimentares significativas com outras praias.

4.2. Agitação marítima

Neste subcapítulo são descritas as condições de agitação marítima ao largo e junto à costa característica da área de estudo, assim como as condições de agitação observadas durante os períodos de simulação (baixa energia, tempestade moderada e tempestade extrema).

4.2.1. Agitação ao largo

Para caracterização da agitação ao largo utilizou-se os dados referidos no trabalho por Andrade *et al.* (2013) que descreve os parâmetros das ondas como: a altura significativa (H_s); período de pico de potência (T_p) e rumo de pico de potência (θ_p) para a zona em estudo.

Na Figura 12 estão representados os valores da altura significativa ao largo onde se observa que a maioria das alturas variam entre 1 a 2 m; a classe entre os 2 e os 3 m é a segunda com maior frequência; os valores superiores a 5 m representam apenas 2.5% das ocorrências. O valor médio de H_s é de 2 m com um desvio padrão de 1.1 m.

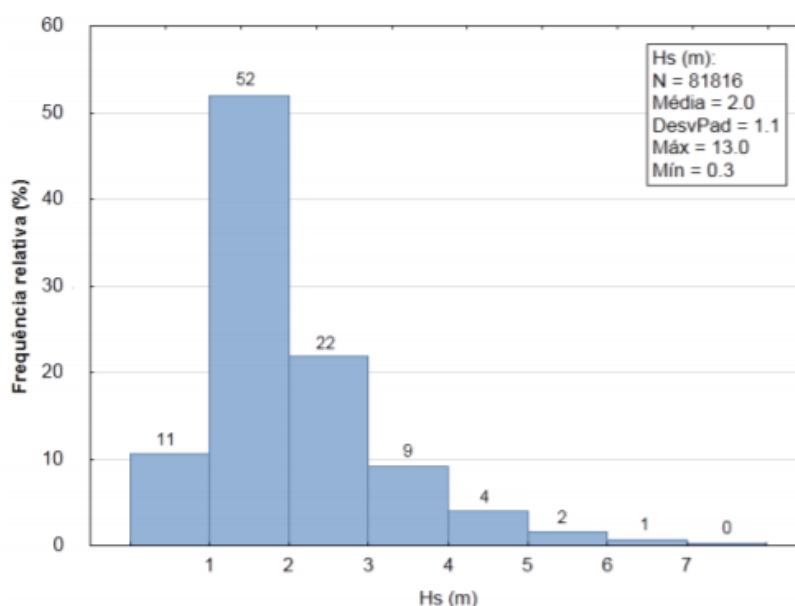


Figura 12: Distribuição de frequências relativas de altura significativa (H_s) (retirado de Andrade *et al.*, 2013).

A Figura 13 representa a distribuição dos valores de período de pico de potência (T_p) onde se constata que o período mais frequente é entre os 9 e os 11s (29%), sendo que 78% das observações situam-se entre os 7 e os 13s. O valor médio de T_p é de 10.5s com desvio-padrão de 2.4s.

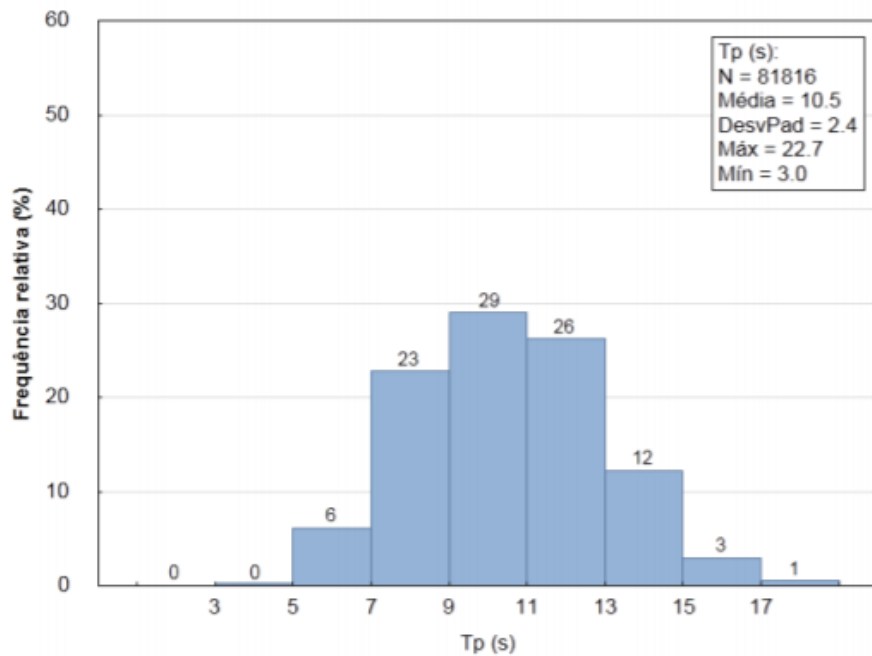


Figura 13: Distribuição de frequências relativas do período de pico (T_p) (retirado de Andrade, et al., 2013).

Na Figura 14 está representada a distribuição direcional do rumo (θ_p) onde se denota que a direção predominante é de noroeste (69%), seguindo-se rumos de oeste ($\approx 20\%$) e norte ($\approx 9\%$) e com muito menos frequência rumos de sudoeste ($< 2\%$). O rumo médio de potência é de 301.5° .

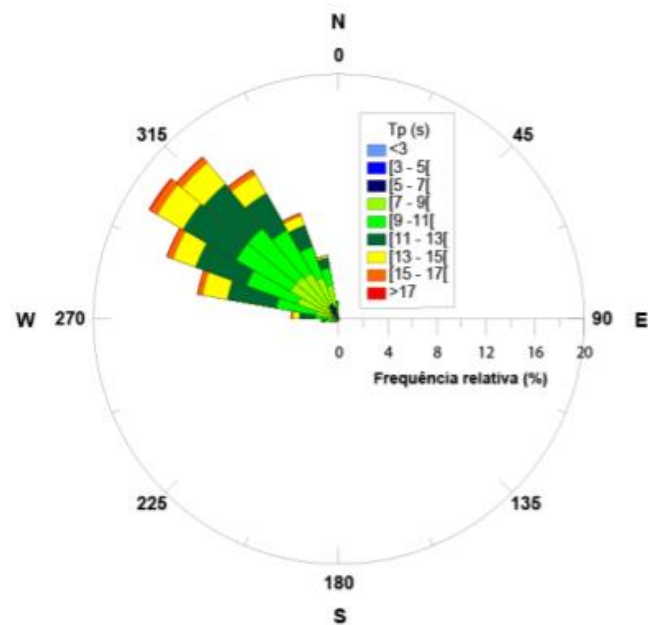


Figura 14: Distribuição do rumo de pico de potência (retirado de Andrade et al., 2013).

4.2.2. Agitação junto à costa e observação de galgamento costeiro

A caracterização geral da agitação junto à costa na praia do Sul foi baseada nos dados referidos no trabalho de Silveira, *et al.* (2013), que se encontram na Tabela 2. Estes valores são referentes a observações ao longo de um ano.

Tabela 2: Caracterização das condições de agitação junto à costa.

Hs méd (m)	Hs max (m)	Tp (s)	Rumo méd (°)
1.5	6.2	9	285

A praia em estudo localiza-se no litoral ocidental, onde existe a predominância de agitação vinda de noroeste associada a área de geração no Atlântico Norte. O facto desta praia ser encaixada, torna-a algo abrigada da agitação predominante. Como tal, os valores dos parâmetros das ondas situam-se ligeiramente abaixo das observações registadas ao largo.

Sumarizam-se em seguida as condições de agitação que permitem caracterizar os três eventos simulados.

4.2.2.1. Evento de baixa energia

Para caracterizar as condições de baixa energia foi realizada uma saída de campo à zona em estudo no dia 21 de janeiro de 2020.

Na Tabela 3 estão representados os valores da altura significativa (Hs), período de pico (Tp) e rumo, registados na boia *Monican* do IH, durante o período da recolha dos dados GPS (~12:30h).

Tabela 3: Valores de Hs, Tp e rumo utilizados nas simulações para a campanha de campo, dados provenientes da boia *Monican* do IH.

Hs méd (m)	Tp (s)	Rumo méd (°)
2.15	16.16	294

Na Figura 15 estão representados os valores de Hs, Tp e rumo registados na boia *Monican* (laranja) e a azul os dados provenientes do *hindcast* ERA5 (Hersbach *et al.*, 2018). De notar a convergência entre as duas fontes de dados. A comparação entre as duas fontes de dados foi efetuada para avaliar a representatividade dos dados ERA5 uma vez que não existem dados da boia *Monican* para as condições de tempestade extrema.

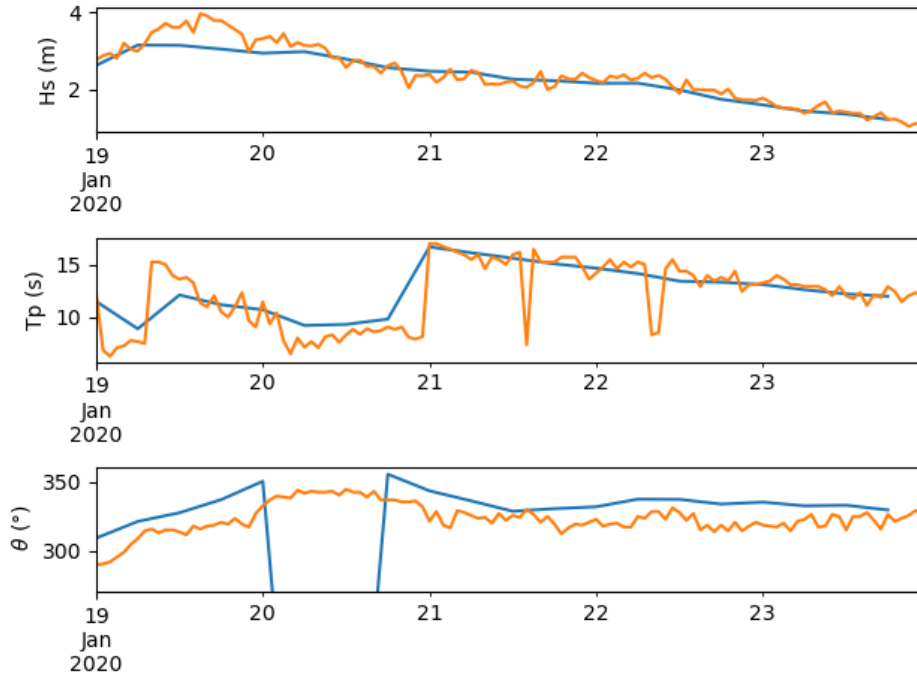


Figura 15: Valores de H_s , T_p e rumo registados na boia Monican (laranja) e ERA5 (azul) para o dia 21/01/2020.

4.2.2.2. Evento de tempestade moderada

O evento de tempestade considerado corresponde à tempestade *Bella* que atingiu a zona norte e centro de Portugal Continental entre o dia 28 e até ao final dia 29 de dezembro de 2020, tendo colocado vários distritos em alerta laranja, devido à forte agitação marítima. Segundo as previsões do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), nos distritos de Aveiro, Braga, Coimbra, Leiria, Lisboa, Porto e Viana do Castelo seriam esperadas ondas de noroeste com 5 a 7m, podendo atingir 12 a 14 m de altura máxima (MadreMedia/Lusa, 2020).

Na Figura 16 estão representados os dados espaciais de altura significativa e período de pico característicos da tempestade *Bella*. Como se observa, os valores de altura significativa variaram entre os 6 e os 9 m, enquanto que o período variou entre os 17 e os 15s, para zona ocidental de Portugal.

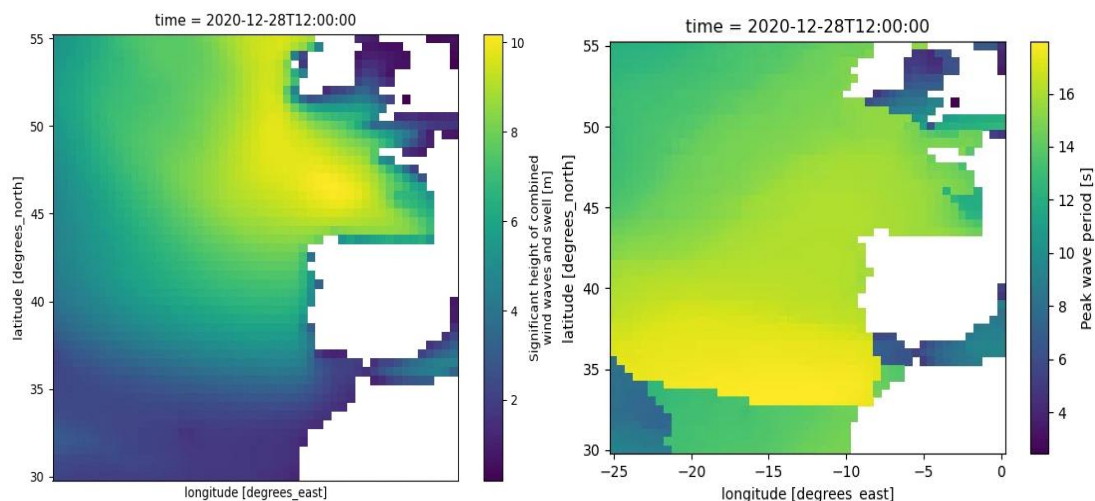


Figura 16: Representação dos valores de altura significativa e período de pico, às 12h do dia 28/12/2020, no decorrer da tempestade Bella. Dados obtidos de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

No dia 28 dezembro de 2020, no decorrer da tempestade *Bella*, foi feita uma visita à praia do Sul, durante a qual se observou galgamento ocasional e pouco significativo do muro que separa o areal do passeio. Na Figura 17 é bem visível o alcance das ondas durante a tempestade.



Figura 17: Galgamento do muro na praia do Sul na Ericeira no dia 28/12/2020 às 12:54h.

Com estas observações em campo é possível deduzir que as cotas de máximo espraio atingiram pelo menos 6.5 m de cota, uma vez que passeio marítimo se situa sensivelmente a esse nível. Estes dados foram utilizados para validar as simulações provenientes do *XBeach*.

Na Tabela 4 estão sintetizados os valores da altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e rumo, registados na boia *Monican* do IH, durante o decorrer das observações feita no dia 28/12/2020, por volta das 13h.

Tabela 4: Valores de Hs, Tp e rumo utilizados nas simulações para a tempestade Bella, dados provenientes da boia Monican do IH.

Hs méd (m)	Tp (s)	Rumo méd (°)
7.96	17.1	323

Na Figura 18 estão representados os valores de Hs, Tp e rumo registados na boia *Monican* (laranja) e a azul os dados provenientes do *hindcast* ERA5 (Hersbach *et al.*, 2018).

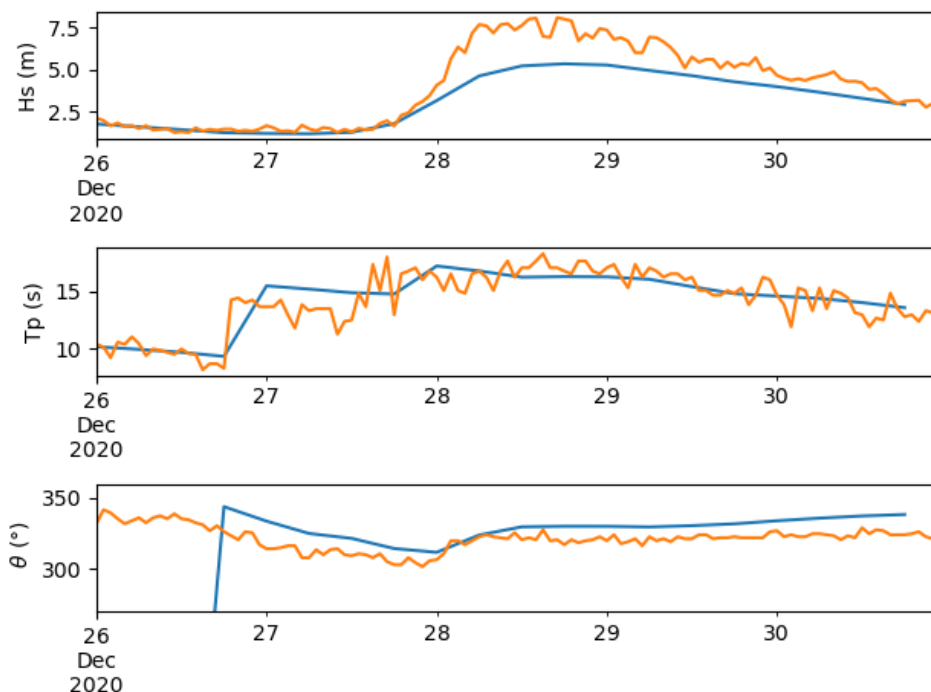


Figura 18: Comparação das condições de agitação marítima referentes à tempestade Bella entre os dados da boia *Monican* (laranja) e do *hindcast* ERA5 (azul).

Constata-se que não existem diferenças consideráveis para o período e para o rumo, no entanto observa-se que os valores de altura significativa registados na Boia *Monican* (IH) são ligeiramente mais baixos do que os reconstituídos no ERA5 (Hersbach *et al.*, 2018).

4.2.2.3. Evento de tempestade extrema

A escolha de um episódio de tempestade extrema baseou-se no estudo da tempestade *Christina*. No inverno de 2014, o litoral português foi bastante afetado por tempestades que provocaram danos em estruturas costeiras, erosão de praias e inúmeros galgamentos e inundações. A tempestade *Christina* resultou de depressões na costa leste dos EUA, em dezembro de 2013, que na passagem pelo Atlântico Norte e devido ao contraste entre a massa de ar fria proveniente da zona leste dos EUA e a massa de ar quente do Atlântico Norte originaram ventos fortes, elevada pluviosidade e intensa agitação marítima (SulInformação, 2014).

Esta depressão ocorreu entre o dia 5 e 7 de janeiro, tendo atingido o pico temporal no dia 6 de janeiro de 2014 com ondas de altura significativa máxima de 9 m e 21s de período de pico na costa ocidental portuguesa (Hersbach *et al.*, 2018). Segundo Antunes (2014), a sobrelevação

meteorológica foi de 0.03 m e a preia-mar naquele dia atingiu o 1.36 m. O pico da tempestade foi por volta das 18:40h do dia 6 de janeiro.

A praia do Sul é um bom exemplo de praias afetadas pela tempestade *Christina* em 2014 (Figura 19). Em consequência desta tempestade a praia teve que ser intervencionada devido aos estragos causados, quer no pavimento do paredão quer no murete envolvente, na rampa de acesso à praia no sector norte, na infraestrutura que serve de apoio à praia e noutro edifício onde se situava uma antiga discoteca (Pinto, 2014). Outras das estruturas afetadas por esta tempestade foram as piscinas do hotel (Santos, *et al.*, 2014). Posteriormente, em 2018, esta zona foi interdita pela proteção civil, devido à forte agitação marítima com ondas a chegar aos 10 m de altura (TVI24, 2018).



Figura 19: Danos causados pela tempestade Cristina na praia do Sul na Ericeira (retirada de Santos *et al.*, 2014).

Na Tabela 5 estão sumarizados os valores da altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e rumo, provenientes do ERA5.

Tabela 5: Valores de H_s médio, T_p e rumo utilizados nas simulações para a tempestade Christina.

H_s méd (m)	T_p (s)	Rumo méd (°)
9	21	293

Na Figura 20 estão representados os valores de Hs, Tp e rumo registados no ERA5 no decorrer da tempestade *Christina*.

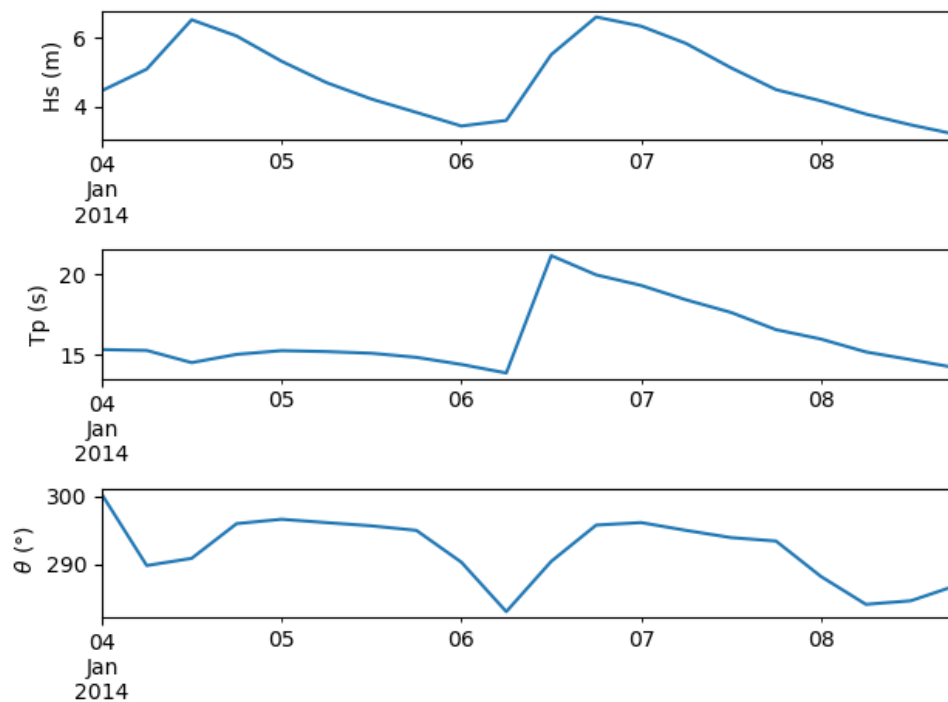


Figura 20: Condições de agitação marítima referentes à tempestade *Christina* provenientes do hindcast ERA5.

4.3. Maré

4.3.1. Evento de baixa energia

As medições de CME realizadas em campo ocorreram entre o 12:36h e o 12:55h durante a preia-mar. A cota de maré registada no marégrafo de Cascais (dgt) foi de 1.13m por volta das 12:36h, como se observa na Figura 21.

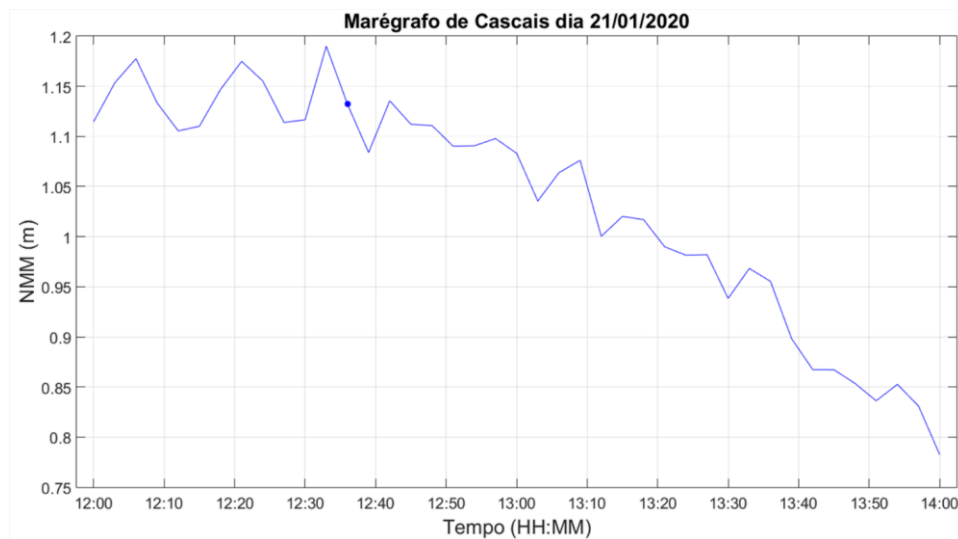


Figura 21: Nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (dgt) entre as 12h e as 14h, no dia 21/01/2020.

4.3.2. Evento de tempestade moderada

As observações feitas durante a tempestade *Bella* ocorreram por volta das 13h do dia 28/12/2020. A cota de maré segundo as previsões do Instituto Hidrográfico (IH, 2020) foi de 2.95 m, durante a preia-mar, como representado na Figura 22. Para este valor ser relativo ao NMM foi subtraído 2.08 m devido à diferença entre o zero hidrográfico e adicionou-se 0.15 cm, por consequência da subida do nível médio do mar. Assim, a cota de maré utilizada nas simulações referentes à tempestade *Bella* foi de 1.02 m.

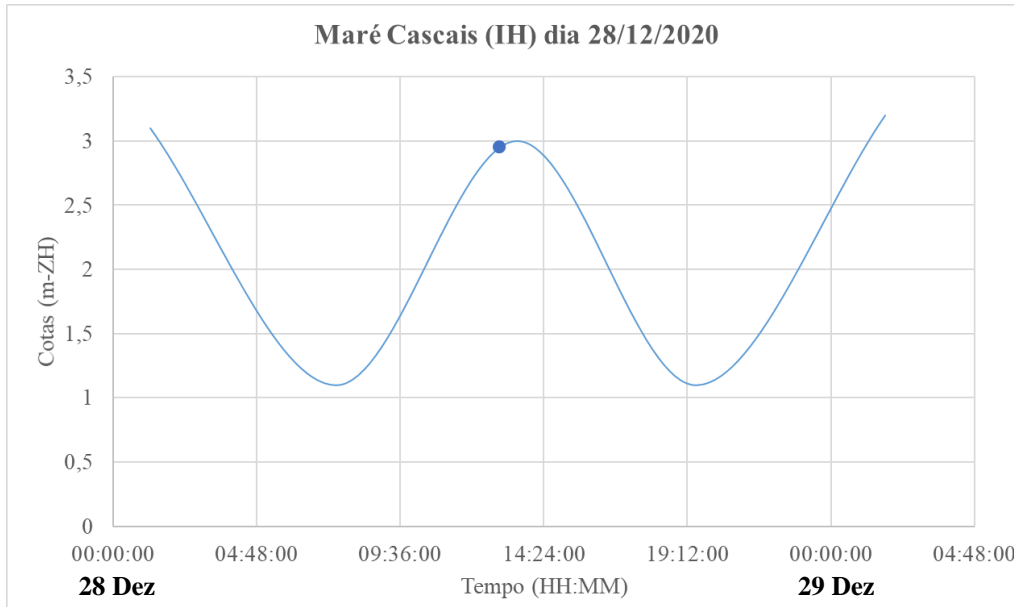


Figura 22: Previsão dos níveis de maré, segundo o IH, para o dia 28/12/2020.

4.3.3. Evento de tempestade extrema

O intervalo de tempo escolhido para simular a tempestade *Christina* foi durante o pico da mesma. Este ocorreu por volta das 18:40h do dia 06/01/2014 e a cota de maré registada no marégrafo de Cascais (dgt) foi de 1.89 m, como se observa na Figura 23.

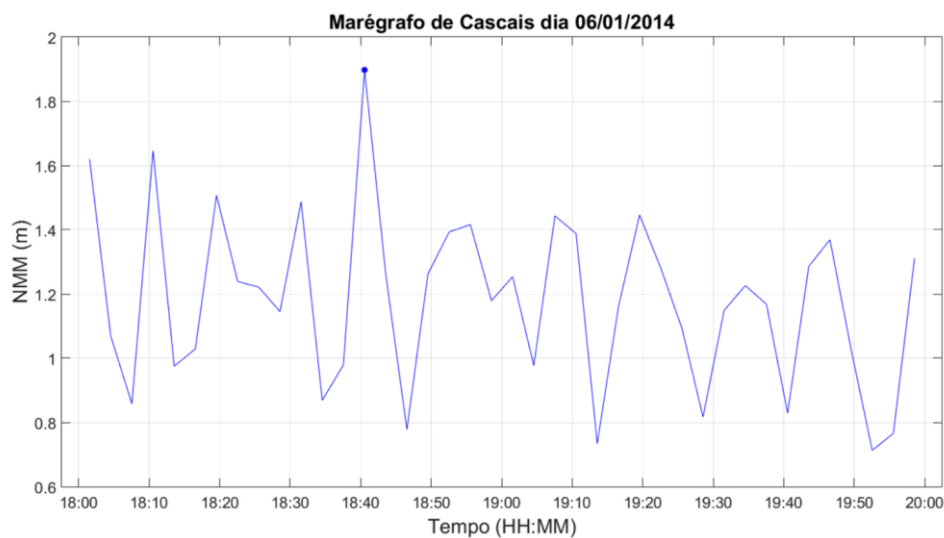


Figura 23: Nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (dgt), no dia 06/01/2014 entre as 18h e as 20h.

4.4. Topo-batimetria

A morfologia da área em estudo utilizada nas simulações foi obtida através da construção de uma malha topo-batimétrica (modelo bidimensional) e de perfis da praia (modelo unidimensional). De seguida serão descritos os processos de aquisição dos dados.

4.4.1. Modelo Bidimensional

A malha do modelo foi construída no programa *ArcGis* a partir dos dados topo-batimétricos, provenientes do LiDAR (dgt, 2011) e de uma malha topo-batimétrica com 30 m de resolução espacial criada no âmbito de um projeto, referido no trabalho de Silveira, *et al.* (2013).

A malha do modelo criada tem 3 m de resolução espacial, o seu limite *offshore* corresponde à batimetria aproximada de 20 m de profundidade até ao limite terrestre da área de estudo, como se observa na Figura 24.



Figura 24: Representação da malha batimétrica da área de estudo construída em ArcGis.

4.4.2. Modelo Unidimensional- Perfis de praia

A batimetria utilizada no modelo unidimensional foi obtida através de um perfil da malha bidimensional, de um perfil levantado por GPS na campanha de campo e por perfis provenientes do programa COSMO (programa de monitorização da faixa costeira de Portugal Continental) criado pela APA.

4.4.2.1. Perfil retirado da malha

O perfil retirado da malha bidimensional corresponde a uma linha da malha batimétrica que se localize o mais próximo possível dos perfis do COSMO, como se observa na Figura 25.

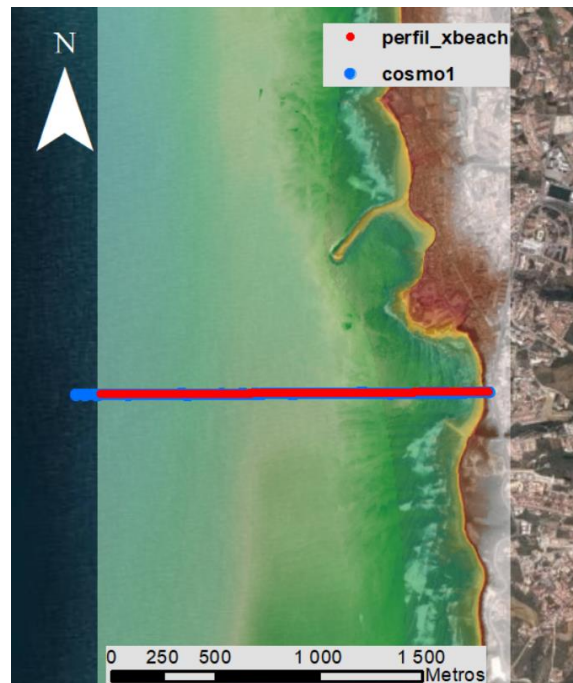


Figura 25: Representação da batimetria em estudo com o a localização do perfil do COSMO e o perfil da malha usado nas simulações do XBeach.

4.4.2.2. Perfil GPS

Na Figura 26 está localizado o perfil levantado na praia do Sul durante os trabalhos de campo com recurso a GPS-RTK no dia 21/01/2020.



Figura 26: Localização do perfil levantado por GPS na praia do Sul, no dia 21/01/2020.

A representação do perfil e a delimitação da face de praia está ilustrada na Figura 27. Pode-se observar que o perfil de praia é refletivo com uma face de praia bastante inclinada e uma berma com extensão considerável.

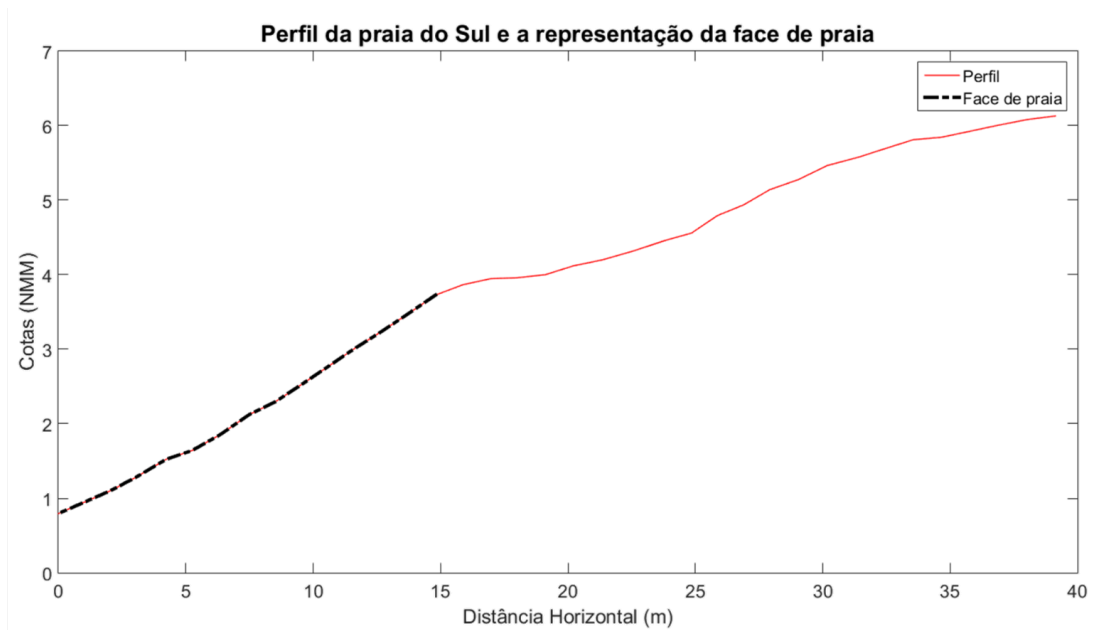


Figura 27: Representação do perfil topográfico da praia do Sul, obtido no dia 21/01/2020.

4.4.2.3. Perfis Totais do COSMO

O COSMO é um programa concebido e desenvolvido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) que consiste na recolha, tratamento e análise de informação sobre a evolução das praias, dunas, fundos submarinos próximos e arribas ao longo da faixa costeira de Portugal Continental (Cosmonline, 2020).

O programa COSMO já realizou 5 campanhas de campo com o intuito de acompanhar as modificações do perfil da praia. As recolhas dos perfis totais da praia do Sul ocorreram durante o inverno de 2018, o início do verão de 2019, em janeiro de 2020, em abril de 2020 e em dezembro de 2020. Para facilitar a visualização da parte emersa do perfil escolheu-se usar os dados desde dos 2 m de profundidade até aproximadamente os 7 m de elevação, uma vez que o paredão se situa a uma cota aproximadamente de 6.5m.

Na Figura 28 está representada a comparação dos 5 perfis onde se observa a subida da berma para cotas mais altas entre abril e dezembro de 2020. Também se observa que os perfis recolhidos no inverno têm uma berma mais proeminente relativamente aos perfis de verão, bem com uma face de praia menos extensa.

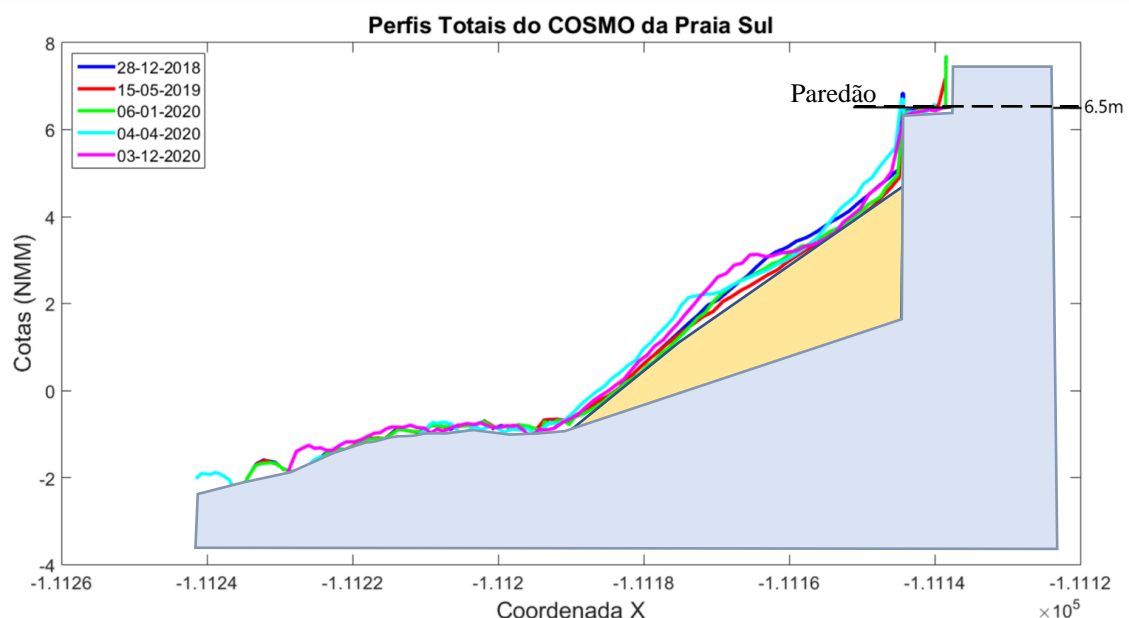


Figura 28: Comparação dos 5 perfis do COSMO representativos da praia do Sul com representação esquemática da areia (a castanho) e da plataforma rochosa (a cinza).

As diferenças anteriormente mencionadas estão relacionadas com a resposta da praia às condições de agitação a que está sujeita ao longo do tempo. Neste tipo de perfis a face de praia é reduzida e com maior inclinação, apresentando uma variabilidade temporal muito reduzida.

4.5. Condições de aplicação da metodologia

Nas secções seguintes irão ser descritas as condições aplicadas nas formulações empíricas e nos métodos numéricos para as três condições de estudo.

4.5.1. Condições de aplicação das fórmulas empíricas

As formulações empíricas têm o objetivo de calcular o *runup*. Neste caso focou-se nas fórmulas que calculam o $R_{2\%}$, uma vez que é possível calculá-lo com os dados obtidos em campo e assim facilitar a comparação de resultados.

As fórmulas utilizadas foram as de Hunt (1959), Mase e Iwagaki (1984), Holman (1986), e Stockdon *et al.* (2006), que dependem da altura significativa da onda, do período de pico, do declive da face de praia e do comprimento de onda ao largo. Foram aplicadas para as duas condições de tempestade e para as condições de baixa energia. O declive da face de praia foi medido sobre o perfil obtido pelo GPS no dia 21/01/2020, representado anteriormente. Os resultados obtidos serão analisados no capítulo 5.

Na Tabela 6 estão sintetizados os valores da agitação marítima ao largo utilizados nas fórmulas empíricas para as três condições de estudo.

Tabela 6: Valores da agitação marítima ao largo utilizados nas fórmulas empíricas para as 3 condições de estudo.

	<i>Christina</i>	<i>Bella</i>	Campo
Hs (m)	9	7.96	2.15
Tp (s)	21	17.1	16.16
L0 (m)	688	456	407
tgβ	0.20		

4.5.2. Condições de aplicação para o SWAN

O modelo SWAN foi utilizado para estimar as condições fronteira para os modelos unidimensional e bidimensional, isto é, para transformar as condições de agitação marítima ao largo para as condições à profundidade dos 21.3 m, correspondente ao limite *offshore* da malha à entrada do perfil.

No modelo unidimensional usou-se um ponto em frente ao perfil em estudo como se observa na Figura 29.



Figura 29: Localização do ponto espectral usado no programa SWAN.

No modelo bidimensional escolheram-se 3 pontos para representar o espectro direcional, representados na Figura 30.



Figura 30: Localização dos 3 pontos usados no modelo SWAN.

4.5.3. Condições de aplicação da teoria linear

A ferramenta *Nazare wave calculator* foi utilizada para transformar as mesmas condições de agitação marítima ao largo, anteriormente referidas, para a profundidade de 21.3 m. Na Tabela 7 estão representados os dados de altura significativa, o período de pico e o rumo das ondas para a referida profundidade utilizados nas simulações.

Tabela 7: Dados da tempestade *Christina*, *Bella* e do dia 21/01/2020 para uma profundidade de 21.3 m.

	<i>Christina</i>	<i>Bella</i>	Campo
Hm0	8.64 m	6.54 m	2.11 m
Tp	21s	17.1s	16.16s
Rumo	280°	297°	283°

4.5.4. Condições de aplicação do *XBeach*

O modelo *XBeach* foi aplicado para as condições referentes à campanha de campo, para a tempestade *Bella* e para a tempestade *Christina*.

Para a tempestade *Christina* e para a campanha de campo utilizou-se um modelo unidimensional em *XBeach*, enquanto que para estudar a tempestade *Bella* usaram-se um modelo unidimensional e outro bidimensional.

Os dados utilizados nas simulações foram fornecidos através de ficheiros de entrada para a batimetria (*bed*), nível do mar (*waterlevel*) e localização dos pontos espectrais (*loclist*), bem como os ficheiros com a agitação marítima resultante do SWAN (*pnt.px*). No caso do modelo bidimensional foram utilizados 3 ficheiros provenientes do SWAN (*pnt.p1*, *pnt.p2*, *pnt.p3*), enquanto que no modelo unidimensional apenas é necessário um (*pnt.p1*).

Nas simulações onde foram utilizados os dados obtidos através da teoria linear, foi construído um ficheiro com os parâmetros necessários para definir um espectro *JONSWAP*. Neste ficheiro são fornecidos os dados de Hm0, Tp, dir, bem como o coeficiente de dispersão direcional(s) e o fator de pico da expressão *JONSWAP* (γ).

O ficheiro *waterlevel* contém a informação sobre as cotas de maré, anteriormente referidas. Optou-se por não variar este valor ao longo do tempo, uma vez que o tempo total de simulação foi de 30 minutos.

No ficheiro *params* estão indicados os ficheiros de entrada anteriormente referidos. Neste ficheiro também se fornece informação sobre a direção das ondas ($\theta_{amin} = -90^\circ$ e $\theta_{amax} = 90^\circ$) e dos processos físicos ativados pelo utilizador. Os processos físicos ajudam a aproximar a simulação à realidade, por isso neste trabalho considerou-se sempre o modo não hidrostático, mantendo os restantes processos ativados por padrão. Para o limitar o domínio batimétrico utilizaram-se os valores de dx e dy, uma vez que a malha tem espaçamento constante.

Os outputs escolhidos foram o zs (cota da superfície livre do mar) e zb (cota do fundo) do tipo global. O registo dos mesmos foi definido de 2 em 2 segundos. Para facilitar a obtenção de resultados o tempo de simulação foi de 1800s.

Todos os valores de cota utilizados ao longo deste trabalho são referidos ao Nível Médio do Mar (NMM).

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos segundo as metodologias anteriormente descritas (fórmulas empíricas, campanha de campo e modelação *XBeach*) para as três condições de estudo. Nas simulações do *XBeach* obtiveram-se diferentes resultados para os mesmos parâmetros de entrada devido à natureza estocástica das simulações com ondas longas (Figura 31). Para cada condição escolheram-se os valores de cota de máximo espraio obtidos com maior frequência ao longo de 15 corridas, executadas pelo *XBeach*. Assim, são representados vários resultados para as simulações onde foi utilizada a teoria linear e outros tantos para as simulações com o recurso ao modelo SWAN.

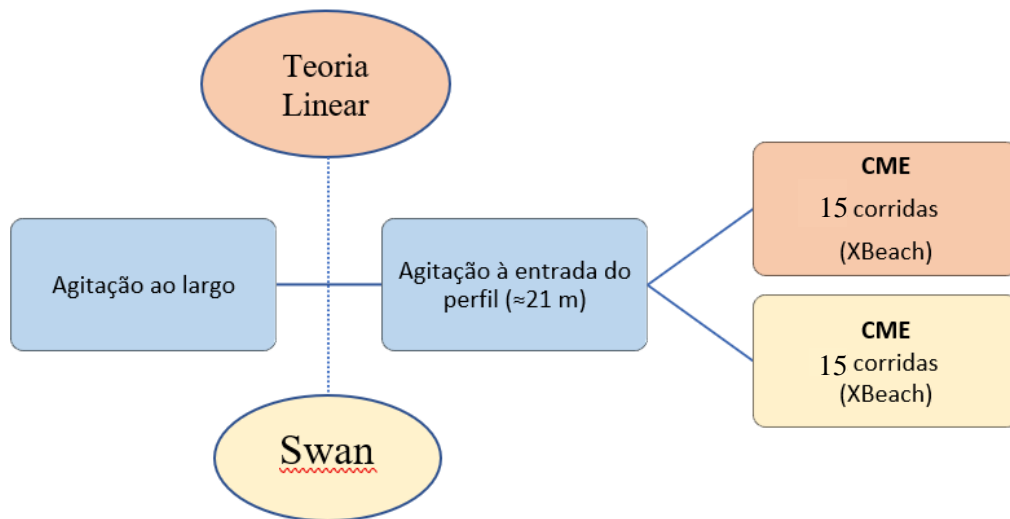


Figura 31: Esquema representativo da metodologia na obtenção de resultados.

5.1. Evento de baixa energia

Neste subcapítulo irão ser tratados os resultados obtidos através dos dados recolhidos no campo, das simulações em *XBeach* e das fórmulas empíricas para as condições de baixa energia.

5.1.1. Medição do espraio

Durante a campanha de campo para além dos levantamentos do perfil topográfico também se mediram 100 espraio de onda consecutivos. Na Figura 32 estão representados os espraio sobre o perfil da praia e a localização dos mesmos.

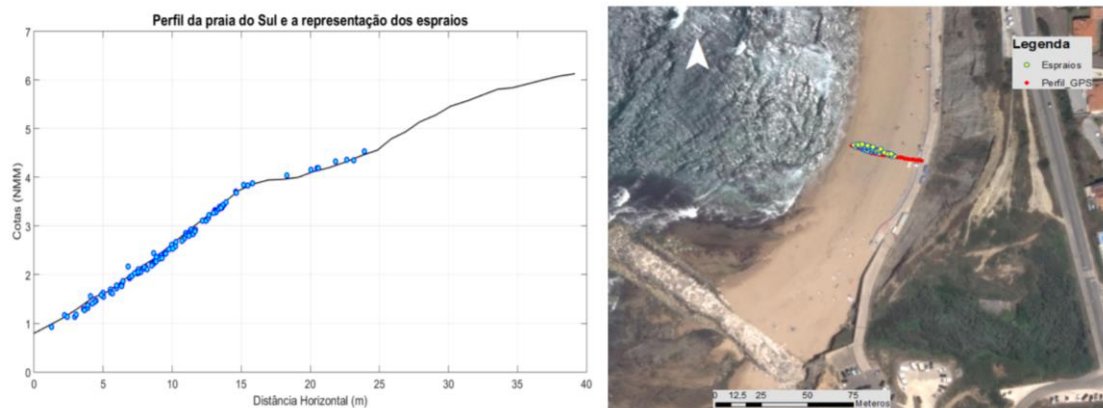


Figura 32: Representação dos 100 espraio medidos sobre o perfil topográfico e localização dos mesmos.

Na Figura 33 estão representadas as cotas de máximo espraio ao longo do tempo de medição.

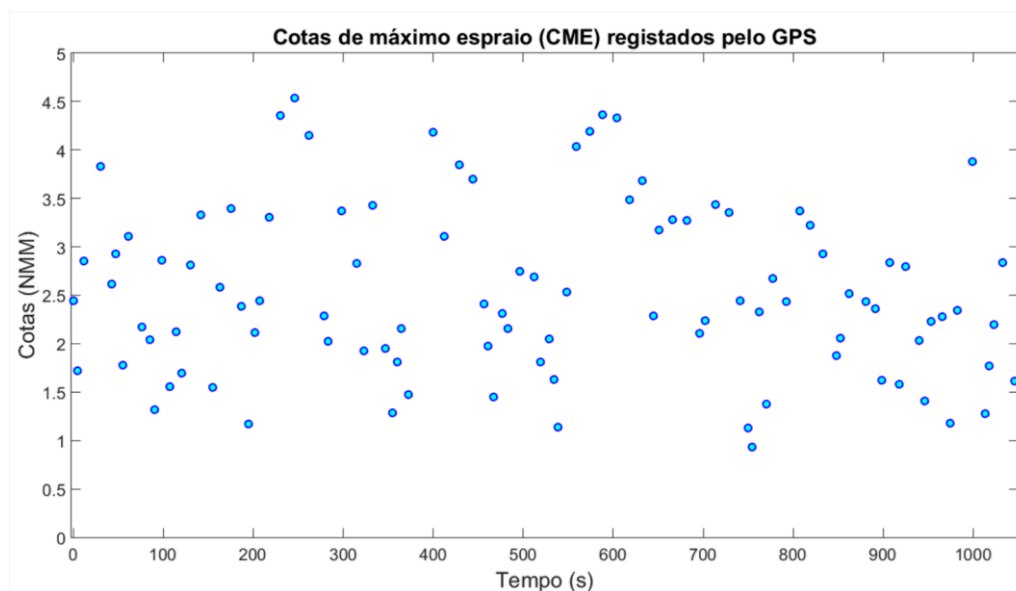


Figura 33: Representação das cotas de máximo espraio medidas pelo GPS.

Com a obtenção da cota de máximo espraio é possível calcular o *runup* associado a partir da relação entre o *runup* e a CME, esquematizada na Figura 34.



Figura 34: Esquema representativo do cálculo do *runup*.

A partir dos valores dos 100 espraio calculou-se o *runup* ($R_{2\%}$), bem como a média, os valores mínimo e máximo, a mediana e os primeiro e terceiro quartis referentes às cotas de máximo espraio, estando representados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores estatísticos referentes à cota do máximo de espraio medida em 100 espraio.

Runup						
Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Q1	Q3	R2%
2.53	0.93	4.54	2.41	1.91	3.18	3.04

5.1.2. Modelação do espraio

Nas simulações em *XBeach*, os valores denominados por CS correspondem às simulações usando o SWAN, enquanto que os denominados de CJ correspondem às simulações realizadas com a teoria linear. Na Figura 35 estão representados os dados obtidos sob a forma de *boxplots* correspondentes aos resultados obtidos para o cálculo da cota de máximo espraio com o *XBeach* em comparação com os valores obtidos pelo GPS.

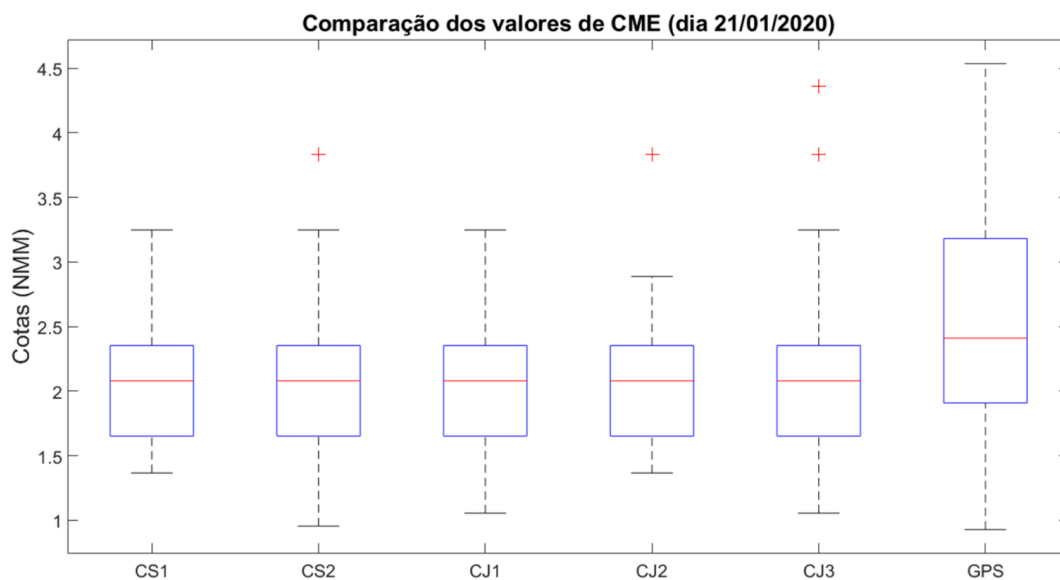


Figura 35: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em *XBeach* (CS1, CS2, CJ1, CJ2 e CJ3) com as medidas no campo com recurso a GPS para o dia 21/01/2020.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores estatísticos obtidos pelo modelo *XBeach* em comparação com os valores de GPS.

Tabela 9: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em *XBeach* comparando com os valores medidos pelo GPS para o dia 21/01/2020.

	CS1	CS2	CJ1	CJ2	CJ3	GPS
Máximo	3.25	3.83	3.25	3.83	4.36	4.54
Mínimo	1.37	0.96	1.06	1.37	1.06	0.93
Média	2.07	2.08	2.09	2.06	2.06	2.53
Q25	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.91
Q50	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.41
Q75	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	3.18

É possível verificar que não existem grandes diferenças entre as simulações usando o espectro SWAN e a teoria linear, com exceção da simulação CJ3, em que o valor máximo se distingue das outras quatro, que está relacionado com o carácter estocástico associado às simulações. Este valor da CJ3 aproxima-se bastante do valor real, podendo-se afirmar que o modelo *XBeach* apresentou um bom desempenho.

Para calcular o *runup* máximo subtraiu-se a cota de maré (1.13m) aos valores máximos da CME, obtidos nas simulações.

Na Tabela 10 estão sintetizados os valores de *runup* calculados para as condições do dia 21/01/2020.

Tabela 10: Comparação dos valores de runup estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o XBeach para o dia 21/01/2020.

		Valores de Runup (m)
R _{2%}	Hunt	3.47
	Holman	5.49
	Mase	8.26
	Stockdon et al.	11.71
	Medido	3.04
R _{máx}	CS1	2.12
	CS2	2.7
	CJ1	2.12
	CJ2	2.7
	CJ3	3.23
	Medido	3.41

Através da Tabela 10 observa-se que os valores de *runup* obtidos variam entre os 3.04 e os 11.71 m. Nesta comparação a equação de Hunt é a que se aproxima mais do R_{2%} medido, enquanto que a de Stockdon é a que se afasta mais da realidade. Também se conclui que os resultados obtidos pelas simulações, com exceção da CJ3, subestimam o valor de *runup* comparando com os valores reais e com os das fórmulas empíricas. De assinalar a pequena diferença entre o *runup* calculado através da CME medida pelo GPS (R_{máx}) e do valor de *runup* calculado através da obtenção dos 100 espraços medidos pelo GPS (R_{2%}).

5.2.Evento de tempestade moderada

Nesta secção comparam-se os resultados obtidos pelas fórmulas empíricas e as simulações em *XBeach* para a tempestade *Bella*. É também avaliada a influência da configuração do perfil de praia nos resultados, utilizando o conjunto de perfis monitorizados no âmbito do programa COSMO. Posteriormente, é ainda ensaiada uma aplicação bidimensional do *XBeach*, que permite considerar os efeitos de proteção oferecida pelo molhe do porto da Ericeira e a variabilidade longilitoral observada neste troço costeiro.

Os valores denominados por BS correspondem às simulações usando o SWAN, enquanto que os denominados de BJ correspondem às simulações realizados com a utilização da teoria linear. Como na situação anterior, obtêm-se vários resultados para os mesmos parâmetros. Na Figura 36 estão representados os *boxplots* correspondentes aos resultados obtidos para o cálculo da cota de máximo espraio em *XBeach*, onde se observa que as simulações BS2, BS3, BJ1, BJ2 apresentam um valor máximo de CME acima da cota dos 6.5 m.

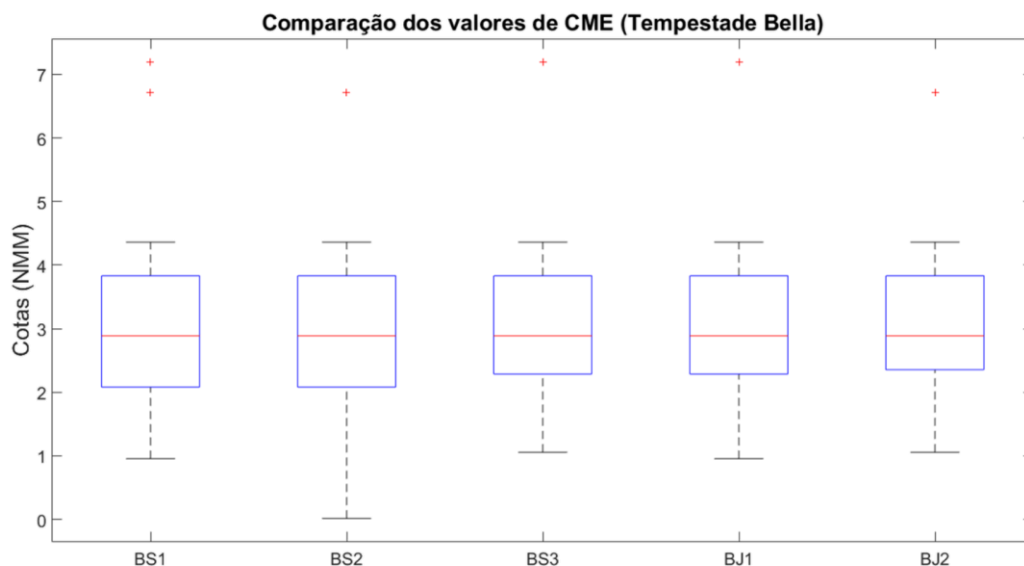


Figura 36: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em *XBeach* para a tempestade *Bella*.

Com a observação da Figura 37 é possível aferir que a simulação BS1 apresenta cinco valores acima da cota dos 6.5 m, quatro valores a atingirem os 6.7 m e apenas um a alcançar a cota dos 7.19 m, significando a existência de cinco episódios de galgamento com magnitudes diferentes.

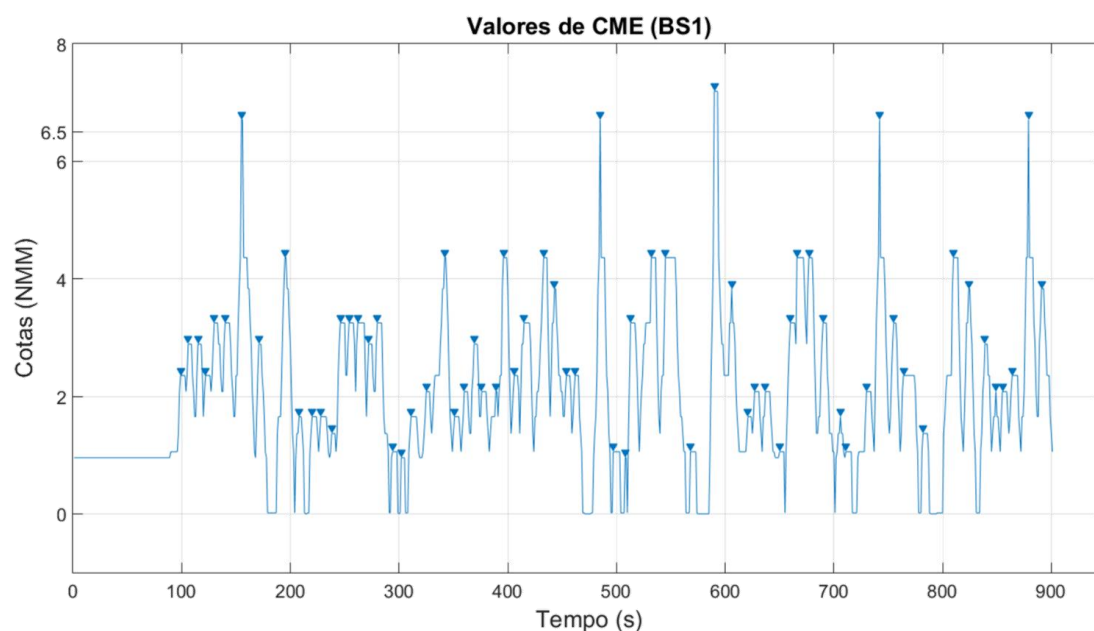


Figura 37: Representação dos valores de CME resultantes da simulação BS1.

Na Tabela 11 estão sintetizados os valores estatísticos obtidos pelo modelo *XBeach*. É possível observar que os valores máximos de CME não variam significativamente entre as simulações utilizando o SWAN e a teoria linear. As diferenças cingem-se na quantidade de ondas que galgam o paredão. Como foi referido anteriormente, apenas na simulação BS1 existem várias ondas a galgar, enquanto que nas restantes apenas uma onda consegue ultrapassar a cota dos 6.5 m durante o tempo de simulação.

Tabela 11: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em *XBeach* para a tempestade *Bella*.

	BS1	BS2	BS3	BJ1	BJ2
Máximo	7.19	6.71	7.19	7.19	6.71
Mínimo	0.96	0.02	1.06	0.96	1.06
Média	2.96	2.90	3.05	2.97	2.97
Q25	2.08	2.08	2.29	2.29	2.35
Q50	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
Q75	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83

Para calcular o *runup* máximo subtraiu-se a cota de maré (1.02 m) aos valores máximos da CME, obtidos nas simulações.

Na Tabela 12 estão sintetizados os valores de *runup* calculados através das formulações empíricas e os obtidos pelas simulações para as condições da tempestade *Bella*.

Tabela 12: Comparação dos valores de *runup* estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o *XBeach* para a tempestade *Bella*.

		Valores de Runup (m)
R2%	Hunt	12.86
	Holman	11.19
	Mase	20.01
	Stockdon et al.	23.85
Rmáx	BS1	6.17
	BS2	5.69
	BS3	6.17
	BJ1	6.17
	BJ2	5.69

Através da Tabela 12 observa-se que os valores de *runup* variam entre os 5.69 e os 23.85m. Segundo os resultados obtidos a equação de Holman é a que se aproxima mais dos valores obtidos pelas simulações, enquanto que a de Stockdon é a que se afasta mais. Conclui-se que os valores obtidos pelas fórmulas empíricas sobrestimam fortemente o valor de *runup* comparados com as observações de campo (onde se verificou que a cota do máximo de espraio pouco excedeu o passeio marítimo - 6.5 m). Os resultados obtidos através da modelação com o *XBeach* ajustam-se muito melhor aos dados reais, podendo-se concluir que o modelo *XBeach* simulou adequadamente o galgamento nas condições da tempestade *Bella*.

5.2.1. Influência do perfil da praia para o cálculo da CME

Para avaliar a influência da morfologia da praia na cota de máximo espraio utilizaram-se 5 perfis do COSMO para as condições da tempestade *Bella*, uma vez que existem observações *in situ* da ocorrência de galgamento. Foi utilizado o modelo *XBeach*, em que o tempo de simulação foi de 5 horas. As numerações dos perfis COSMO estão por ordem cronológica do seu levantamento, sendo o COSMO 1 correspondente ao perfil datado de dezembro de 2018 e o COSMO 5 o perfil levantado em dezembro de 2020.

Cosmo 1

Na Figura 38 está representada a variação da CME no COSMO 1, onde é possível constatar que a cota do paredão (6.5 m) é ultrapassada pelas ondas. Depois do primeiro galgamento do murete que limita o paredão, a água fica retida pelo que o valor do máximo espraio se mantém muito elevado e igual à cota do paredão. Este efeito é consequência da simulação ser unidimensional.

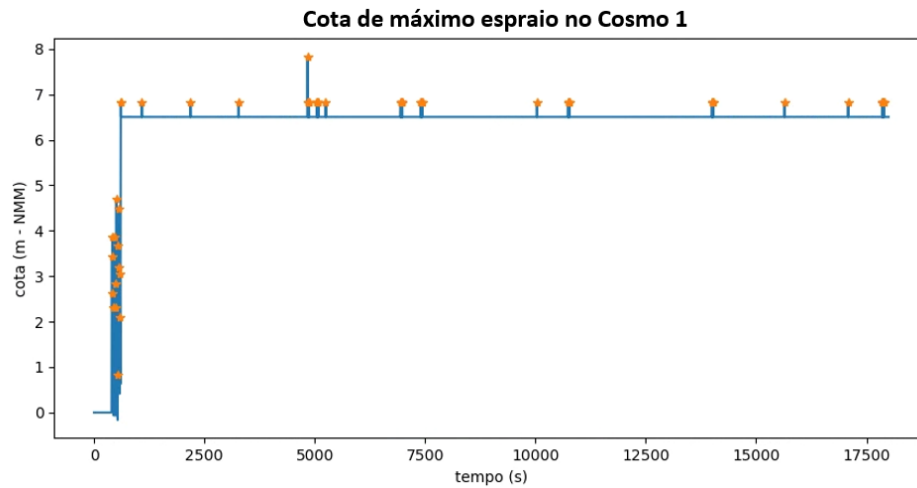


Figura 38: Variação da CME no COSMO 1 ao longo do intervalo de tempo simulado.

Cosmo 2

Na Figura 39 está representada a variação da CME no COSMO 2, em que se observa que os fenómenos de galgamento são pouco frequentes, embora a cota atingida seja de 6.57m, ligeiramente acima da cota do paredão.

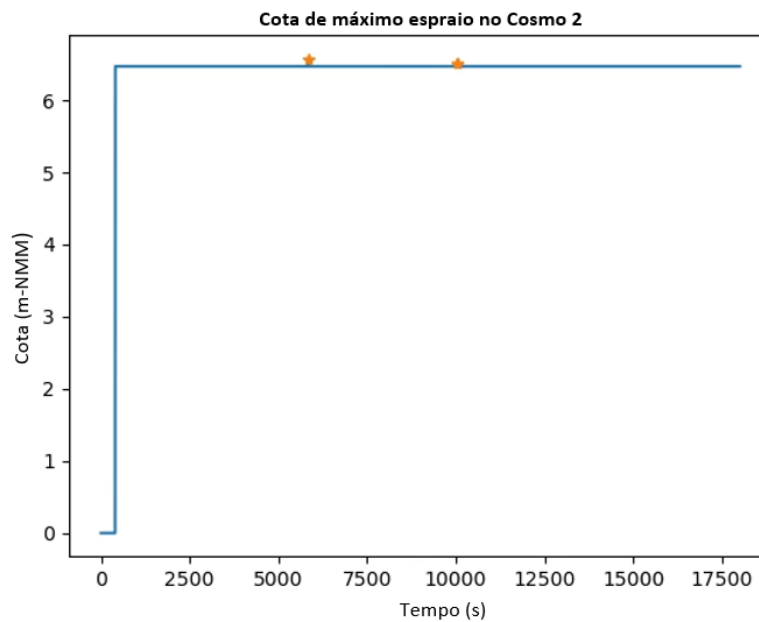


Figura 39: Variação da CME no COSMO 2 ao longo do intervalo de tempo simulado.

Cosmo 3

Na Figura 40 está representada a variação da CME no COSMO 3, onde se constata que a maioria dos galgamentos só excedem ligeiramente o paredão, embora haja um espraio a alcançar a cota dos 7.67 m.

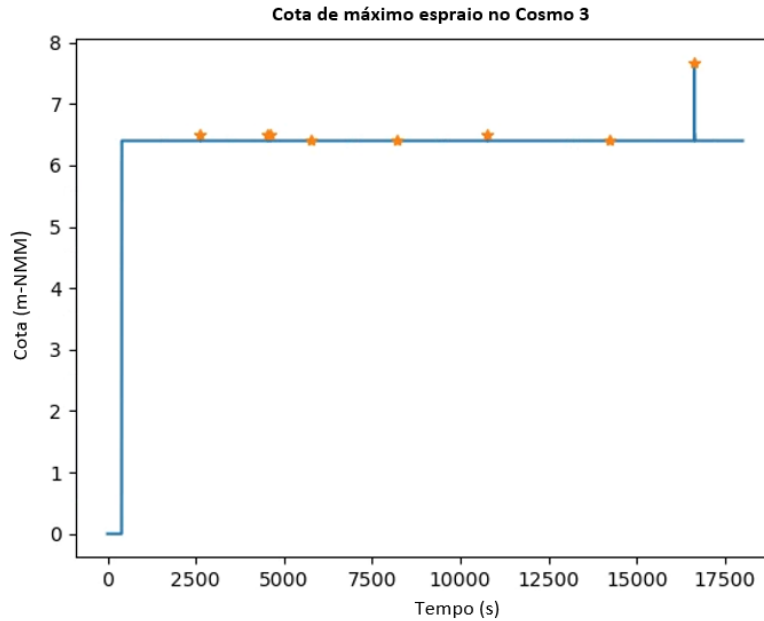


Figura 40: Variação da CME no COSMO 3 ao longo do intervalo de tempo simulado.

Cosmo 4

Na Figura 41 está representada a variação da CME no COSMO 4, onde se observa que as cotas ultrapassam os 6.5 m, significando a existência de galgamento do murete.

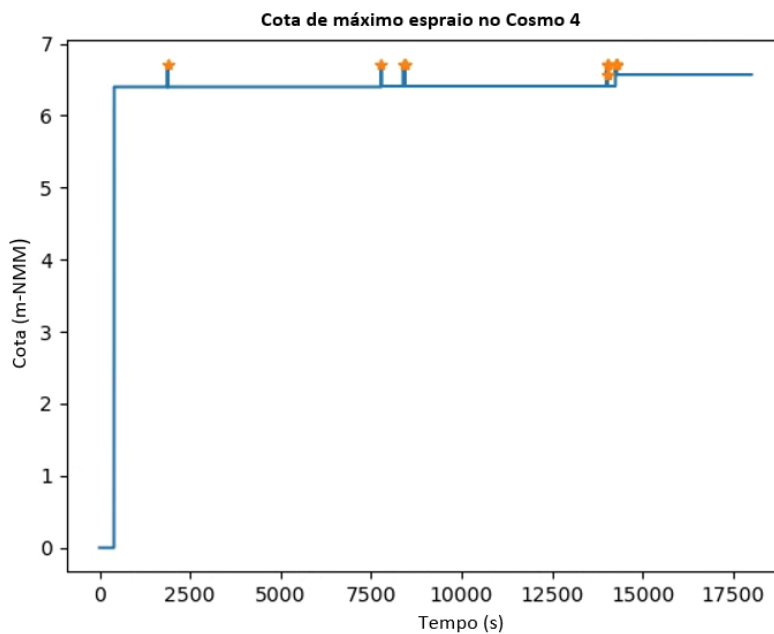


Figura 41: Variação da CME no COSMO 4 ao longo do intervalo de tempo simulado.

Cosmo 5

Na Figura 42 está representada a variação da CME no COSMO 5, onde se observam poucos fenômenos de galgamento, em que a cota de máximo espraio atinge os 6.5 m, no limite do murete.

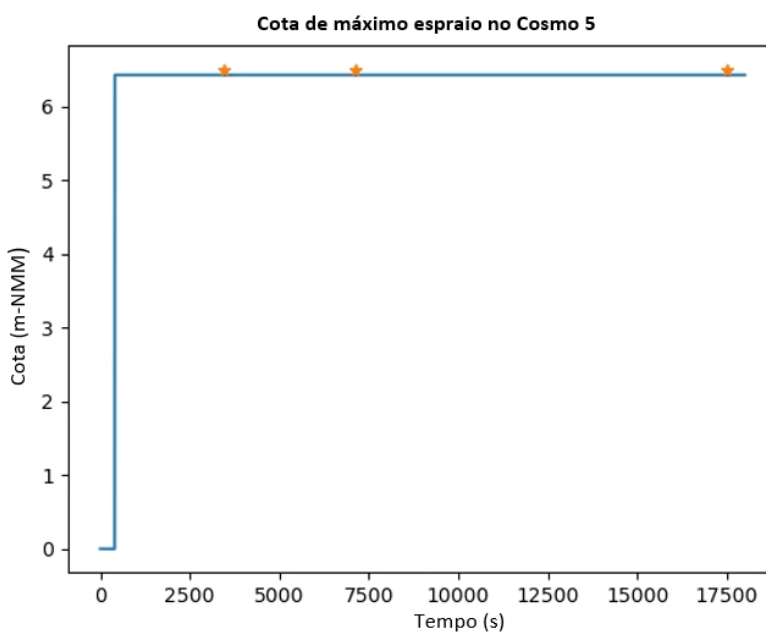


Figura 42: Variação da CME no COSMO 5 ao longo do intervalo de tempo simulado.

Na Tabela 13 estão representados os valores obtidos na simulação em *XBeach* para os vários perfis do COSMO durante a tempestade *Bella*.

Tabela 13: Valores máximos de CME obtidos para os 5 perfis do COSMO durante a tempestade *Bella*.

	CME (m)
Cosmo1	7.8
Cosmo2	6.57
Cosmo3	7.67
Cosmo4	6.71
Cosmo5	6.5

Analisando os valores obtidos verifica-se que em todas as simulações se prevê um galgamento esporádico do paredão, o que é compatível com as observações de campo efetuadas. Acresce ainda, que a convergência nos resultados obtidos para os vários perfis aponta para que a variação morfológica nesta praia não terá uma influência determinante na estimação da cota de máximo espraio, ou seja, na ocorrência de fenômenos de galgamento.

5.2.2. Resultados do modelo bidimensional

No modelo bidimensional simularam-se as condições de agitação referentes à tempestade *Bella*.

Na Figura 43 está representada uma perspectiva 2D da zona de estudo destacando-se o encaixe da praia e do molhe do porto da Ericeira a norte.

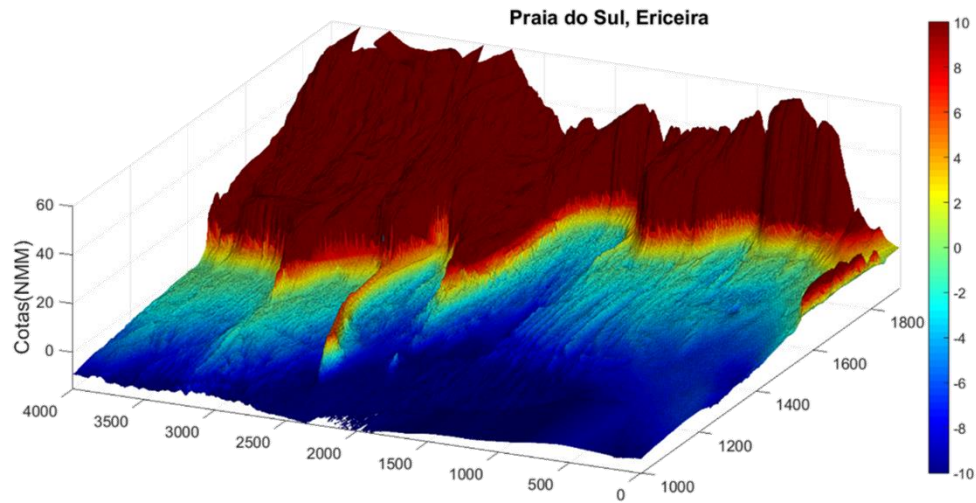


Figura 43: Modelo bidimensional do litoral envolvente da Praia do Sul, Ericeira.

Na Figura 44 estão representados os valores da cota de máximo espraio obtidos pelo modelo bidimensional ao longo da simulação. Estes valores são referentes à linha da malha computacional que se aproxima mais do perfil 1D. Como se pode observar a CME não ultrapassa os 4 m de altura, ficando aquém dos resultados obtidos no modelo unidimensional.

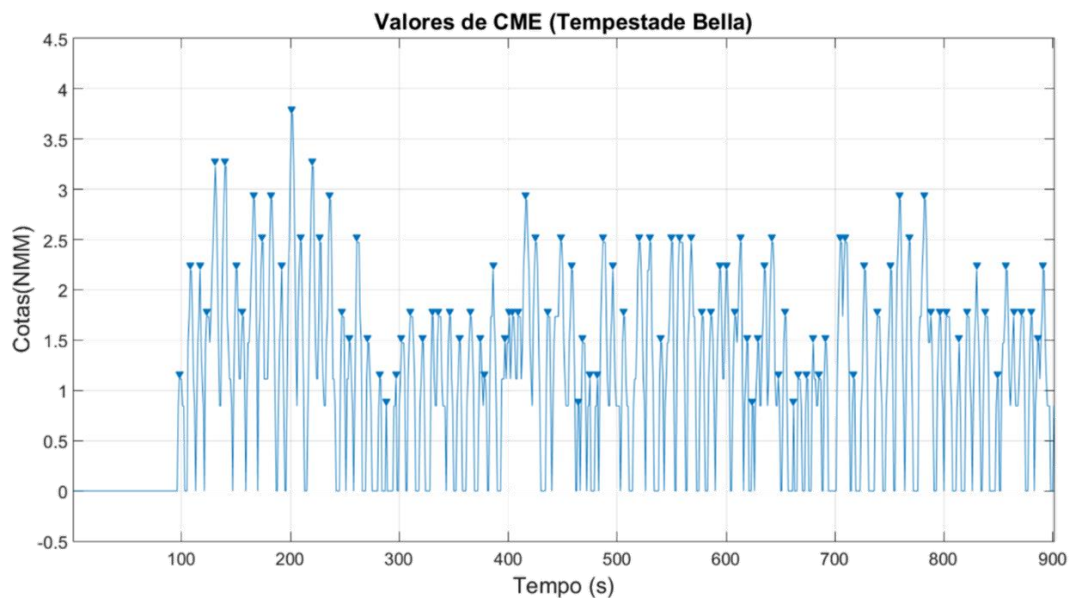


Figura 44: Valores de CME obtidos pelo modelo bidimensional.

Na Figura 45 está representada a morfologia da área em estudo e do nível do mar para o intervalo de tempo em que a CME é atingida no perfil da praia, demonstrado na Figura 44.

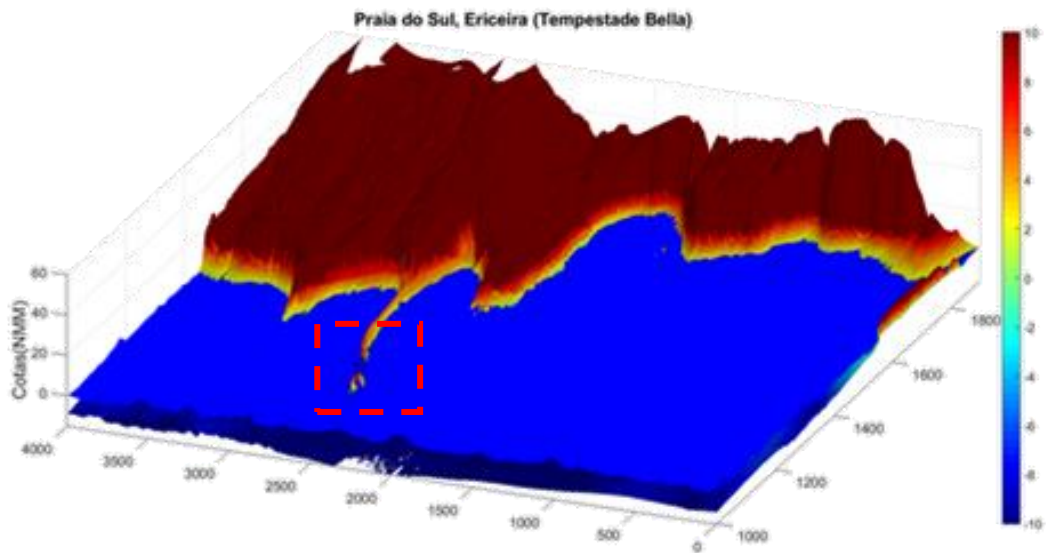


Figura 45: Modelo 2D da praia do Sul e representação nível do mar para num certo instante no tempo.

Na Figura 46 observa-se a ampliação da área destacada na Figura 45, evidenciando o galgamento do molhe do porto.

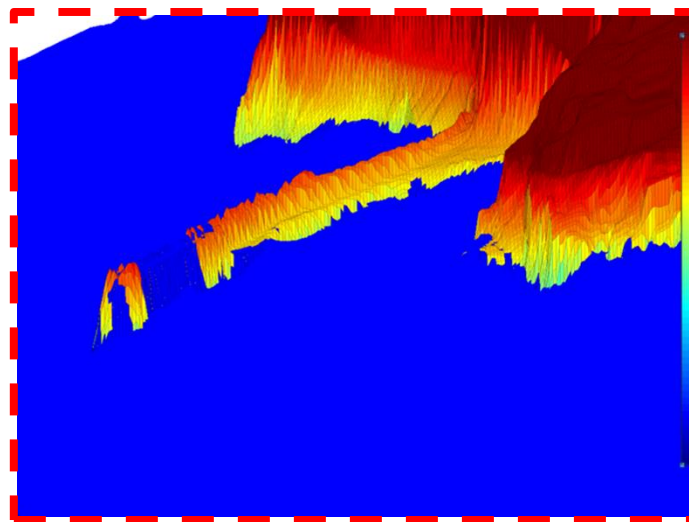


Figura 46: Secção aumentada do modelo bidimensional, destacando o galgamento do molhe situado na Ericeira.

Na Figura 47 está representada a propagação das ondas no modelo bidimensional num determinado instante. É possível observar a predominância da ondulação vinda de noroeste e o efeito de abrigo a que a praia está sujeita.

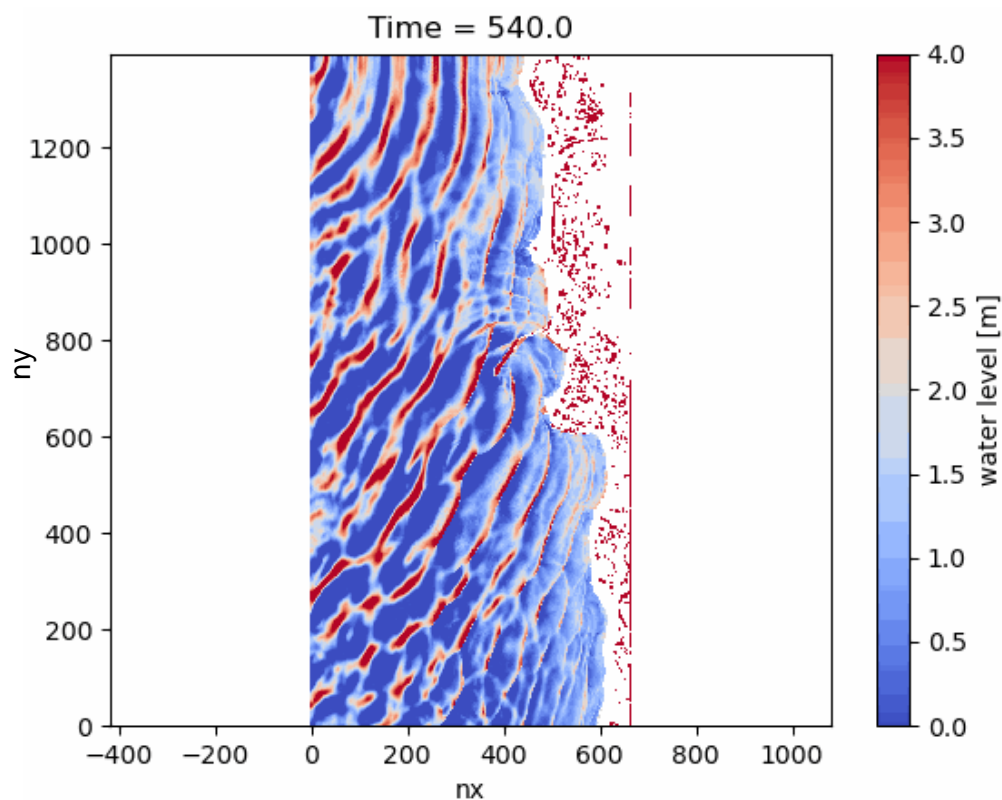


Figura 47: Representação dos resultados obtidos com o modelo 2D no instante $t=540s$ da simulação.

Como referido anteriormente, a CME no perfil da praia não atinge os 4 m de cota, no entanto na zona no molhe estas cotas são ultrapassadas ocorrendo galgamento do mesmo, o que está de acordo com as observações de campo (Figura 48).



Figura 48: Galgamento do molhe localizado na praia dos pescadores a norte da praia do Sul, no dia 28/12/2020 por volta das 12:50h.

Assim, a aplicação do modelo numa malha bidimensional subestimou o alcance do *runup* na praia em estudo, embora tenha fornecido bons resultados para a zona do molhe do porto da Ericeira. As razões para este comportamento não foram exploradas no âmbito deste trabalho mas poderão estar relacionadas com uma deficiente caracterização do espectro direcional da agitação incidente que maximizou o efeito de abrigo oferecido pelo molhe do porto na zona costeira imediatamente a sotamar.

5.3. Evento de tempestade extrema

Nesta secção foram comparados os resultados obtidos pelas fórmulas empíricas e as simulações efetuadas pelo modelo *XBeach* para a tempestade *Christina*.

Os valores denominados por CHS correspondem às simulações usando o SWAN, enquanto que os denominados de CHJ correspondem às simulações realizados com a teoria linear. À semelhança das situações anteriores obtiveram-se vários resultados para os mesmos parâmetros. Na Figura 49 estão representados os *boxplots* correspondentes aos resultados obtidos para a cota de máximo espraio em *XBeach*.

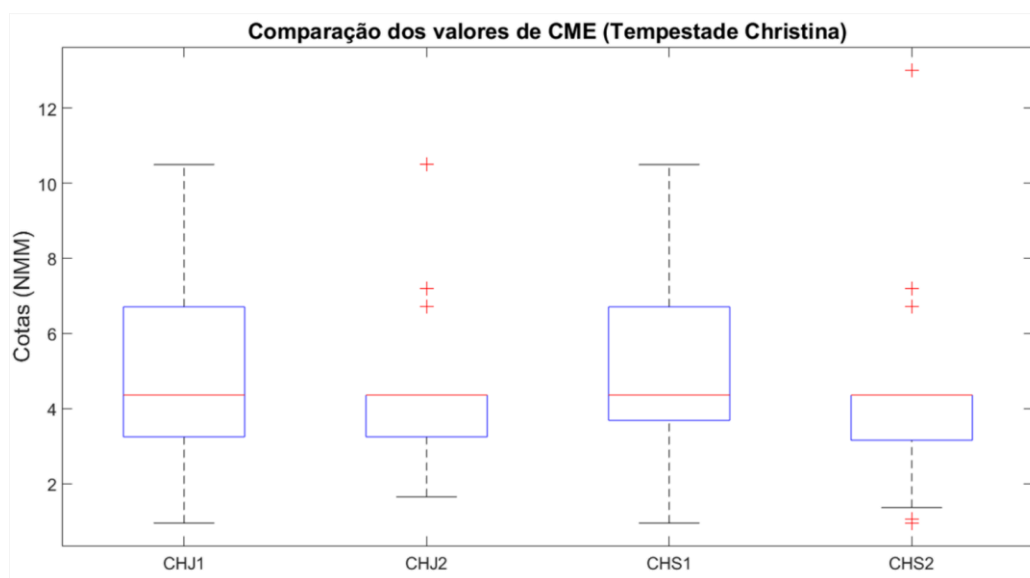


Figura 49: Comparação das cotas de máximo espraio correspondentes às simulações em *XBeach* para a tempestade *Christina*.

Na Tabela 14 estão sintetizados os valores estatísticos obtidos pelo modelo *XBeach*. É possível observar que os valores máximos de CME não variam entre as simulações com o modelo SWAN e a teoria linear, com exceção da simulação CHS2.

Tabela 14: Resultados das cotas de máximo espraio (m) obtidos pelas simulações em XBeach para a tempestade Christina.

	CHJ1	CHJ2	CHS1	CHS2
Máximo	10.49	10.49	10.49	13.00
Mínimo	0.96	1.65	0.955	0.96
Média	4.47	4.28	4.56	4.13
Q25	3.25	3.25	3.69	3.16
Q50	4.36	4.36	4.36	4.36
Q75	6.71	4.36	6.71	4.36

Comparando os valores de CME, representados na Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53 é possível constatar que existe apenas uma cota de máximo espraio a atingir o seu valor máximo para cada simulação. Nas simulações CHS1 e CHJ1 existem 16 valores de CME acima dos 6.5m, enquanto que para as simulações CHS2 e CHJ2 registam-se 10 e 11 valores a ultrapassarem a cota dos 6.5m. Assim, verifica-se que são simulados vários episódios de galgamento do passeio marítimo (paredão). As cotas e frequência de galgamento simuladas são congruentes com os danos relatados na comunicação social e no relatório de ocorrências efetuado pela APA, anteriormente referidos.

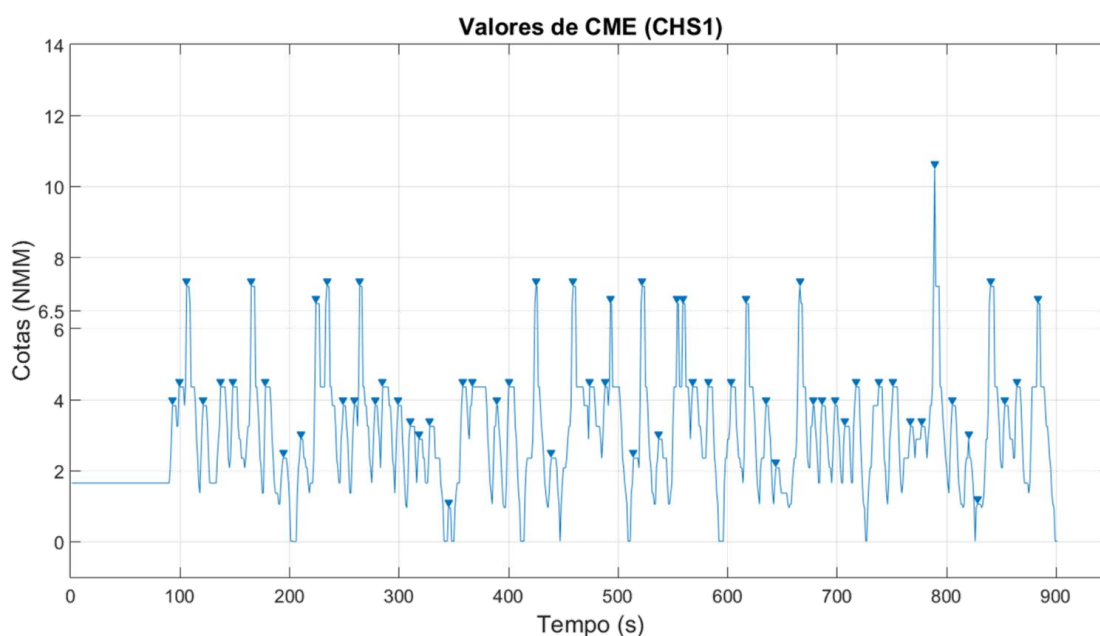


Figura 50: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHS1.

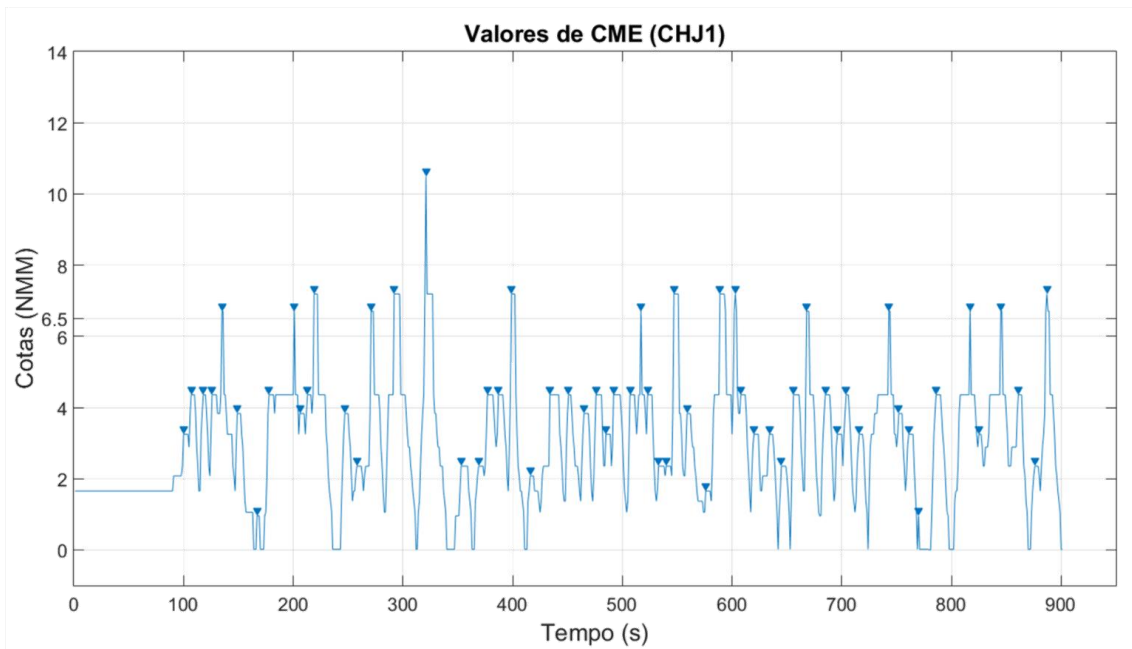


Figura 51: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHJ1.

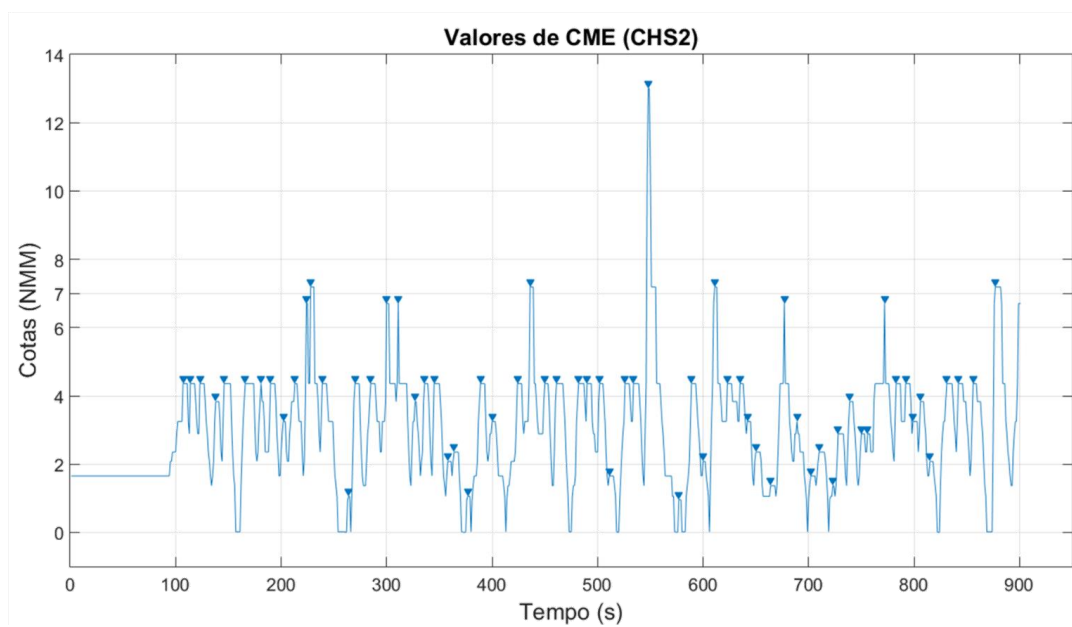


Figura 52: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHS2.

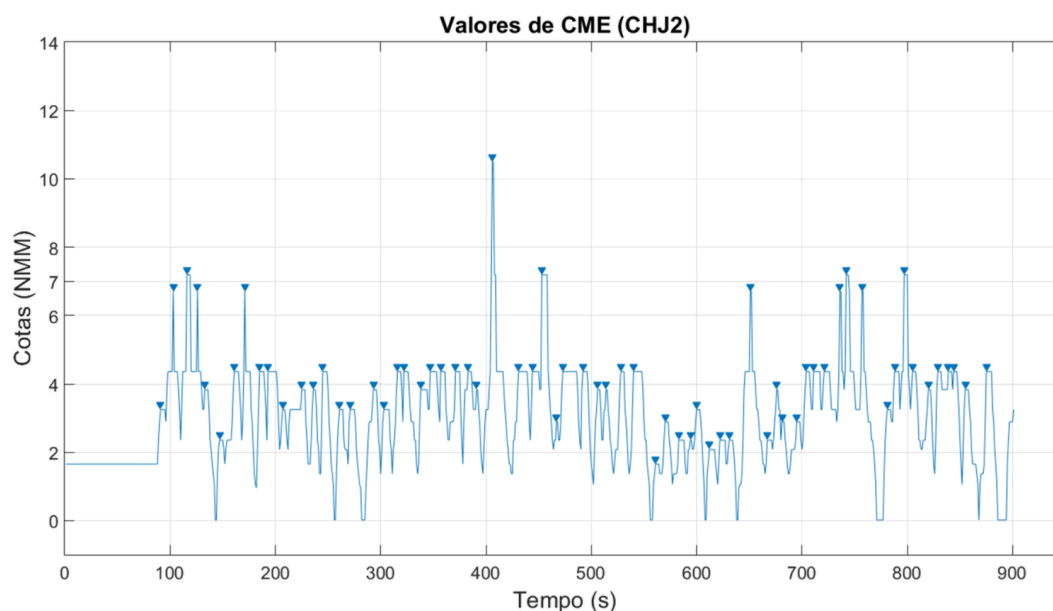


Figura 53: Representação dos valores de CME resultantes da simulação CHJ2.

Para calcular o *runup* máximo subtraiu-se a cota de maré (1.89 m) aos valores máximos da CME, obtidos nas simulações.

Na Tabela 15 estão sintetizados os valores de *runup* calculados para as condições da tempestade *Christina*.

Tabela 15: Comparação dos valores de *runup* estimados a partir de fórmulas empíricas e dos referentes às simulações com o XBeach para a tempestade *Christina*.

		Valores de Runup (m)
R2%	Hunt	12.54
	Holman	14.61
	Mase	25.06
	Stockdon et al.	31.14
Rmáx	CHJ1	8.6
	CHJ2	8.6
	CHS1	8.6
	CHS2	11.11

Através da Tabela 15 observa-se que os valores de *runup* estimados variam entre os 8.6 e os 31.14 m. Segundo os resultados obtidos a equação de Hunt é a que se aproxima mais dos valores obtidos pelas simulações, enquanto que a de Stockdon é a que se afasta mais. Mais uma vez, conclui-se que os valores obtidos pelas fórmulas empíricas sobrestimam o valor de *runup*. Os resultados provenientes das simulações CHJ1, CHJ2, CHS1 ajustam-se aos valores referidos na bibliografia sobre a tempestade *Christina*.

6. Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi aplicar e avaliar o desempenho de várias estratégias de modelação para estimar os valores de *runup* e de espraio das ondas em contexto de praia encaixada, limitada por uma estrutura rígida e que se desenvolve sobre uma plataforma rochosa. O trabalho foi desenvolvido utilizando como caso de estudo a praia do Sul ou da Baleia, situada na Ericeira. Os resultados estimados através das formulações empíricas de Hunt (1959), Mase e Iwagaki (1984), Holman (1986) e Stockdon *et al.* (2006) e da aplicação dos modelos SWAN mais *XBeach* para três condições de agitação marítima diferentes foram validados com dados de campo.

Da análise dos resultados de campo obtidos em condições de baixa energia conclui-se que os valores de *runup* obtidos através do modelo numérico (*XBeach*) aproximam-se do valor observado, e relativamente aos métodos empíricos o que produz resultados mais aproximados do *runup* obtido pelo modelo é a fórmula de Hunt (1959).

Para as condições de uma tempestade moderada (*Bella* – dezembro de 2020), os resultados mostram que nas simulações existe galgamento do paredão, concordando assim com as observações efetuadas no local. Nestas condições de agitação as formulações empíricas dão valores significativamente superiores aos observados, sendo que a equação de Holman (1986) é a que se afasta menos da realidade.

Analisando os resultados obtidos para as condições da tempestade *Christina* (janeiro de 2014), verifica-se que os valores obtidos através do *XBeach* são concordantes com os valores descritos na bibliografia em que se descreve galgamento e destruição do paredão da praia. Comparando os valores com as fórmulas empíricas observa-se que o método de Hunt (1959) é aquele que se aproxima mais dos valores obtidos pelo *XBeach*.

Através dos resultados das simulações conclui-se que o modelo *XBeach* representa adequadamente as características do galgamento em condições de baixa energia e tempestade, numa praia encaixada sobre plataforma rochosa. Por outro lado, comprova-se que as fórmulas empíricas tendem a sobrestimar muito significativamente o valor do *runup*, principalmente para ondas com período elevado. Este comportamento poderá estar associado ao elevado declive da praia utilizado, que maximiza o galgamento na maioria das expressões utilizadas, como por exemplo as equações de Mase e Iwagaki (1984) e Stockdon *et al.* (2006).

Verifica-se que a utilização da teoria linear é adequada para definir as condições fonteira no limite *offshore* do modelo 1D (aprox. 21 m de profundidade), facilitando a obtenção de resultados, não apresentando grandes diferenças comparada com o modelo SWAN.

Utilizando um conjunto de levantamentos sucessivos obtidos no âmbito do programa COSMO, verifica-se que as variações topográficas no perfil de praia observadas a escala sazonal e plurianual são relativamente reduzidas e não condicionam significativamente os resultados do galgamento. Esta conclusão que deverá ser partilhada com a maior parte das praias que se desenvolvem sobre uma plataforma rochosa, tem como implicação que a frequência de monitorização poderá ser relativamente reduzida sem perda de qualidade significativa na previsão de episódios de galgamento e justifica a aplicação do *XBeach* sem incorporar a componente morfodinâmica.

Analisando os resultados das simulações 2D observa-se que estas representam bem o galgamento no molhe da Ericeira mas parecem subestimar o galgamento no perfil, talvez em consequência dos efeitos de abrigo locais não estarem a ser corretamente simulados. Como hipótese para este desvio, sugere-se a possibilidade do espectro direcional ao largo não estar bem representado. Como o modelo o SWAN foi forçado com parâmetros de onda integrais, as condições de fronteira utilizadas podem não representar corretamente a dispersão direcional da energia, o que poderá levar à subestimação de algumas componentes de oeste (menos afetadas pelo efeito de abrigo).

Num contexto geral pode-se afirmar que os objetivos principais do trabalho foram atingidos, comprovando-se que o *XBeach* é uma boa ferramenta para estimar fenómenos de galgamentos oceânicos e contribuir para a caracterização do risco de inundação e galgamento na faixa costeira.

Naturalmente a aplicação desenvolvida neste trabalho constitui uma abordagem incompleta ao problema do galgamento costeiro. Sugere-se que em trabalhos futuros a abordagem aqui ensaiada deverá ser estendida no tempo e no espaço, ou seja aplicada a contextos geomorfológicos distintos e considerando séries temporais de agitação e do nível do mar que permitam caracterizar estatisticamente o galgamento junto à costa. A utilização da abordagem 2D deverá ser estendida e a utilização do *XBeach* incluindo a componente morfodinâmica deverá ser utilizada em contextos de praia/duna. Deverá ainda ser dada particular atenção à obtenção de dados para validação do modelo incluindo a utilização de medições com transdutores, registo de vídeo-monitorização e outras observações de campo.

7. Bibliografia

Agência Portuguesa do Ambiente (2012). Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral 2012-2015. Lisboa.

Andrade, C.F., Taborda, R., Oliveira, M.A., Alves, M., Carapuço, A.M. (2013). Caracterização do clima de agitação junto ao largo. Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo. Entregável 1.1.7.a. Lisboa. 14pp

Antunes, C. (2014) – Eventos extremos e a variação do nível do mar. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, 24-26 junho.

Booji, N., Ris, R. C., e Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.

Carapuço, M., Cunha, A., Taborda, R., Andrade, C.F, Maurício, C. 2015, <http://nazarewave.rd.ciencias.ulisboa.pt/wavetools.html>

COSMOLINE. (2020). Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental. Agência Portuguesa do Ambiente. Obtido de <https://cosmo.apambiente.pt/about>

den Bieman, J. (2013). *XBeach grid tutorial*. Delft: Deltares.

DGTerritório. (2011). Modelo Digital do Terreno das Zonas Costeiras de Portugal Continental com resolução de 1 m (400 m em terra) - LiDAR (Continente). Direção Geral do Território.

DHI (2008). *Profile development: LITPROF user guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark.

Faria, C. (2009). *Previsão da agitação marítima na Costa Noroeste Portuguesa: implementação do modelo SWAN*. Tese de mestrado integrado em Engenharia Civil (especialização em Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 74pp.

Ferreira, A. (2018). *Estudo Galgamento no Troço de Costa Cascais-Carcavelos*. Dissertação de Mestrado em Ciências do Mar, Faculdade de Ciências de Lisboa, Lisboa.

Guza, R. T. and Inman, D. L., (1975). *Edge waves and beach cups*. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21), 2997-3012.

Guza, R.T. and Thornton, E.B. (1982). *Swash oscillations on a natural beach*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87 (C1), pp. 483-491.

Heleno, A. (2017). *Avaliação do Espraimento e Inundação nas praias da Costa da Caparica. Modelação com o modelo XBEACH*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Hermínio, João M. (2015). *Cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos*. Dissertação de Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências de Lisboa, Lisboa, janeiro.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Acedido em 15 de janeiro de 2021

- Holman, R.A. (1986). *Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach*. In Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 527-544.
- Hunt, I. A. (1959). *Design of seawalls and breakwaters*. Journal of Waterways and Harbours Division, 85, pp. 123-152.
- IH. (2020). MONICAN - MONItorização do CANhão da Nazaré. Instituto Hidrográfico. Obtido a 29 de dezembro de 2020, de <http://monican.hidrografico.pt/default/monican.php>
- Komar, P. D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N J, 429 p.
- Larson, M., Kubota, S., Erikson L. (2004). *Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling*, Marine Geology, Volume 212, Issues 1–4, pp. 61-79.
- MadreMedia/Lusa (2020). Tempestade Bella. IPMA prolonga aviso laranja de agitação marítima em sete distritos. <https://24.sapo.pt/atualidade/artigos/tempestade-bella-ipma-prolonga-aviso-laranja-de-agitacao-maritima-em-sete-distritos> , acedido em 17 de janeiro de 2021.
- Makaske, B. and Augustinus, P.G.E.F., (1998). *Morphological Changes of a Micro-tidal, Low Wave Energy Beach Face during a Spring-Neap Cycle*, Rhone-Delta, France. Jour. of Coastal Research, 14, pp. 632-645.
- Mase, H. and Iwagaki, Y., (1984). *Run-up of random waves on gentle slopes*. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 593-609.
- Masselink, G. & Hughes, M. G. (2003). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Arnold, London, 354p.
- Nielsen, P. e Hanslow, D. J. (1991). *Wave Runup Distributions on Natural Beaches*. Journal of Coastal Research, 7, 1139-1152.
- Oliveira, F. S. B. F. (2012). *Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades*. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, Lisboa, Portugal.
- Pinto, C., Rodrigues, A., Costa, C., & Lima, J. (2014). *Registo das ocorrências no litoral Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014*. Agência Portuguesa do Ambiente. Obtido de http://www.apambiente.pt/zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional_Ocorr_Jan_2014_V5.pdf
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., Lescinski, J. e McCall, R. (2010). *XBeach model description and manual*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Roelvink, D., Van Dongeren, A. P., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., de Vet, L., Nederhoff, K. e Quataert, E. (2015). *XBEACH Technical Reference: Kingsday Release*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delf University of Technology.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J. e Beach, R. A. (2001). *Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of properties backing beaches*. Journal of Coastal Research, 17, 407-419.

- Sampaio, M. (2008). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa. 65pp. Obtido de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/2353642168033>
- Santos, A., Mendes, S., Corte-Real, J. (2014). *Impacts of the storm Hercules in Portugal*. Finisterra-Revista Portuguesa de Geografia, XLIX, 98, 197-220. Obtido de http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0430-50272014000200013&lng=pt&tlng=en.
- Silva, A.N., Taborda, R., Lira, C., Andrade, C.F., Silveira, T.M., Freitas, M.C. (2013). *Determinação e cartografia da perigosidade associada à erosão de praias e ao galgamento oceânico. Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo*. Entregável 1.3.2.a. Lisboa. 34pp
- Silveira, T.M., Diogo, Z.S., Taborda, R., Andrade, C.F., Sousa, H., Silva, A.N., Carapuço, A.M. (2013). *Caracterização da variabilidade morfodinâmica sazonal das praias-piloto representativas do litoral em estudo. Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo*. Entregável 1.2.3.e. Lisboa. 146pp
- Silveira, T.M., Taborda, R., Andrade, C.F., Silva, A.N., Carapuço, A.M. (2013). *Caracterização do clima de agitação junto à costa. Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo*. Entregável 1.1.7.b. Lisboa. 112pp
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger Jr., A. H., (2006). *Empirical parameterization of setup, swash, and runup*, Coastal Engineering, 53(7): 573-588.
- Sul Informação (2014). IPMA explica as razões que levaram à “tempestade perfeita” na costa portuguesa. <https://www.sulinformacao.pt/2014/01/ipma-explica-as-razoes-que-levaram-a-%E2%80%9Ctempestade-perfeita%E2%80%9D-na-costa-portuguesa/>, acedido em 13 de julho de 2020.
- Sutherland, J., (2010). *Guidelines on Beach Monitoring for Coastal Erosion in Concepts and Science for Coastal Erosion Management* (Conscience) Project. Deliverable D15, 30pp.
- SWAN. (2020). *SWAN User Manual - SWAN Cycle III version 41.31*. Delft: Delft University of Technology. Obtido de <http://swanmodel.sourceforge.net/>
- Taborda, R., Ribeiro, M.A., (2015). A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, 234, 204–210. doi:10.1016/j. geomorph.2015.01.015.
- Teixeira, S. B. (2009). *Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve*. Administração da Região Hidrográfica do Algarve. Faro, 207p.
- TVI24 (2018). *Proteção Civil interdita duas praias na Ericeira*, <https://tvi24.iol.pt/aominuto/5a9678d40cf29778fd1dda5b/protecao-civil-interdita-acessos-a-duas-praias-na-ericeira/5a983f6b0cf248c46ec430c4>, acedido em 20 de julho de 2019.
- Van der Meer, J.W., (1988). *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Vidal, C., Losada, M.A., E.P.D., 1995. Suitable Wave Height Parameter for Characterizing Breakwater Stability. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE 121.

Vousdoukas, M. I., Almeida, L. P. e Ferreira, Ó. (2011). *Modelling storm-induced beach morphological change in a meso-tidal reflective beach using XBeach*. *Journal of Coastal Research* 64: 1916-1920.

Zijlema, M., Stelling, G. e Smit, P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.